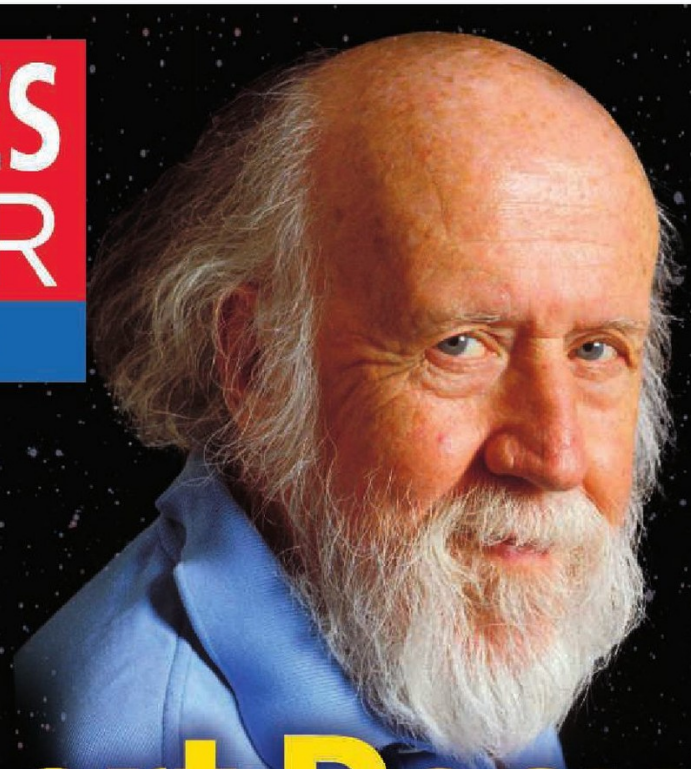
Le jour où l'Homme faillit disparaître p.78

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©JOHN FOLEY/OPALE
NASA-ESA-GETTY RAPLH/OOXAMO



Hubert Reeves

"Il y a des choses qui nous dépassent"

Dossier

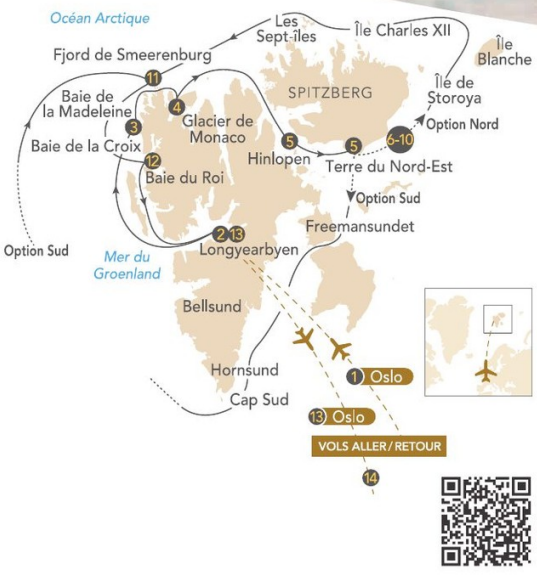
Magnétoiles, lunes, trous blancs...

LES ASTRES LES PLUS INTRIGANTS

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 922 - DÉCEMBRE - HUBERT REEVES

DÉCEMBRE 2023 - N° 922 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60 € / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 922 S - F: 5,30 € - RD



Voyages d'exception est heureux de vous proposer une fabuleuse **croisière** aux confins des trésors cachés du **Spitzberg** et de l'**Arctique** à bord de l'**Ocean Nova**. Votre équipe de guides conférenciers vous fera découvrir des lieux forts, mais aussi **des sites insolites et remarquables**.

Photos : © Adobe Stock © Ocean Nova - Evelyn Pfeiffer

Croisière au Spitzberg, terre des ours polaires

par Voyages d'exception

DU 7 AU 20 JUILLET 2024

Dès **9 300 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code SCSPI à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

- CROISIÈRES FRANCOPHONES
- ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS
- CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

VOYAGES-EXCEPTION.FR

HONDA

Découvrez la nouvelle
Gamme SUV Honda électrifiée :
100% Électrique, Hybride intégral
ou Hybride rechargeable.

Conçu pour durer

JUSQU'À 10 ANS DE GARANTIE MOTEUR OFFERTE*

e:Ny1 ZR-V HR-V CR-V

Découvrez quelle Honda électrifiée est faite pour vous et toutes nos offres sur honda.fr

Consommations mixtes WLTP min - max et émissions de CO_2 mixtes WLTP min - max : e:Ny1 18,2 - 18,2 kWh/100 km et 0 g/km ; ZR-V 5,7 - 5,8 l/100 km et 130 - 132 g/km ; HR-V 5,4 - 5,4 l/100 km et 122 - 122 g/km ; CR-V 0,8 - 6,7 l/100 km et 18 - 151 g/km.

*Sous réserve du suivi régulier de l'entretien Honda selon les préconisations constructeur et les indications de l'ordinateur de bord. Offre soumise à d'autres conditions disponibles sur auto.honda.fr. **Garanties des batteries: électriques 8 ans, hybrides 5 ans, standards 3 ans.** Honda Motor Europe Limited (France) Parc d'activités de Pariest, Allée du 1er Mai – Croissy Beaubourg BP 46 – 77312 MARNE-LA-VALLEE Cedex 02 (FRANCE) – Enregistré au RCS sous le SIRET : 509 243 564 00028.

Pensez à covoiturer #SeDéplacerMoinsPolluer

BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Jouer à l'apprenti sorcier

C'est un ami que *Sciences et Avenir-La Recherche* vient de perdre avec la disparition d'Hubert Reeves, dont le beau visage orne une fois encore la couverture de notre magazine. Alors même que se préparait un dossier consacré à l'Univers prévu de longue date, nous ne pouvions pas ne pas rendre ainsi hommage à l'astrophysicien le plus connu — et aimé — des Français. Bien connu aussi au-delà, qu'il s'agisse de francophones québécois, belges, suisses ou africains… comme d'anglophones ayant lu ses très nombreux ouvrages.

Génie humain. À cette heure où nous évoquons l'immense conteur qu'il fut, c'est un de ses avertissements majeurs que nous voulons garder en mémoire. En la période troublée que nous vivons aujourd'hui, ce grand scientifique qui nous faisait aimer le cosmos et la planète Terre ne manquait pas de souligner avec insistance à quel point notre génie humain, notre grande intelligence — celle qui a permis à *H. sapiens* de se développer dans la nature — pouvait se retourner contre nous. Mauvais génie ?

Fragilité de l'humanité. Il réitérait cette alerte lors de sa conférence inaugurale en 2016 au grand débat « Science et conscience » organisé par *Sciences et Avenir–La Recherche* au Collège des Bernardins à Paris, quand il déclarait que *« nous sommes tous fragiles par rapport à nos propres créations »*. Reprenant la célèbre phrase de Rabelais selon laquelle science sans conscience n'est que ruine de l'âme, il estimait qu'on allait désormais beaucoup plus loin : *« Ce n'est que ruine de l'humanité. »*

Bombe atomique. Pessimisme décourageant ? Au contraire, le scientifique lançait ainsi un appel à la réflexion sur la précarité de notre existence. À un sursaut de conscience. Si l'humanité a su échapper pendant des millénaires aux bêtes sauvages, c'est avec elle-même qu'elle doit maintenant composer. En tant que physicien ayant intensément vécu la période de la guerre froide, il citait le péril nucléaire. Tout en considérant que ce danger majeur était comme passé au second plan. C'était il y a sept ans et il n'aura échappé à personne que tout récemment, plusieurs dirigeants ont brandi la menace de la bombe atomique sur la scène internationale. Discours de terreur pouvant sembler irrationnel, ce qui le rend d'autant plus atterrant.

Changement climatique. Hubert Reeves insistait alors sur la deuxième grande menace pour l'humanité, venue au premier plan, celle du changement climatique. Président émérite de l'association Humanité et biodiversité, il explicitait leurs différences. Imminence du danger causé par l'explosion de bombes nucléaires pour l'une, décennies voire siècles pendant lesquels les effets les plus graves du dérèglement climatique allaient se faire sentir pour l'autre. Ce dérèglement, de fait, est déjà là, l'année 2023 ayant de fortes chances d'être la plus chaude jamais enregistrée sur la planète. De Hubert notre ami l'astrophysicien qui voulait le bien de l'humanité, on retiendra forcément la mise en garde selon laquelle *« nous jouons à l'apprenti sorcier »*. ■

COURRIER

« Le testament de Stephen Hawking : l'origine du temps »
(Sciences et Avenir-La Recherche n° 920, octobre 2023)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« La lecture du dossier sur l'origine du temps m'a enchanté ! En effet, pour un sujet ardu, les explications sont claires, avec des mots simples bien choisis. Le tout agrémenté d'exemples très explicites. Je ne peux que dire : bravo ! »

Antoine Rey

Colonie martienne

Vingt-deux astronautes seraient suffisants pour établir une colonie martienne (*S. et A.* n° 920), à condition qu'il s'agisse de personnes qualifiées d'« agréables »… et de sexe différent, a-t-on envie d'ajouter ? Est-il prévu entre ces personnes une vie sexuelle à visée au moins reproductrice pour assurer, au mieux et à long terme, non pas une colonisation mais la naissance d'une humanité martienne, perspective à la fois naturelle et vertigineuse ? **Vincent Maunoury**

S. et A. : Cette étude, réalisée par une équipe de l'université George-Mason aux États-Unis, repose sur des simulations informatiques. Elle suggère qu'une vingtaine d'individus pourraient survivre pendant au moins 28 ans sur Mars s'ils possèdent — entre autres choses ! — des profils psychologiques particuliers : sociables, non agressifs et très peu portés sur la compétition. Sur une échelle de temps beaucoup plus longue, de plusieurs siècles voire des milliers d'années, la diversité génétique devrait effectivement être prise en compte. En 2018, deux chercheurs français ont ainsi calculé qu'un équipage d'au moins 98 personnes serait nécessaire pour survivre à un voyage de 6800 ans jusqu'à Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de nous. Un résultat qui pourrait être extrapolé à la persistance d'une colonie martienne sur une période équivalente.

Étrange beignet

Je m'interroge sur la terminologie de « beignet de décharges électriques… » à propos de l'éruption du Hunga Tonga en janvier 2022 (*S. et A.* n° 920). Est-ce une erreur ou bien pouvez-vous expliquer le terme ? **Simone Gindt**

S. et A. : Le terme de « beignet » s'explique par la nature exceptionnelle de l'éruption du volcan Hunga Tonga. Celle-ci a en effet donné lieu à des phénomènes encore inconnus des volcanologues. Ainsi, la chercheuse Alexa Van Eaton a eu la surprise de voir se former un immense anneau constitué d'éclairs, dont le diamètre atteignait les 280 km. Elle compare cet anneau à un beignet (un « donut » en américain, c'est-à-dire un beignet en forme d'anneau, avec un trou en son centre). Elle remarque également qu'à un moment, l'anneau de foudre a semblé se dissiper, puis que le trou du beignet s'est rempli de milliers d'éclairs.

Précisions

Chromosomes. Dans l'article « Le séquençage du génome humain est enfin complet » (*S. et A.* n° 920, p. 20), nous avons écrit par erreur que *« dans chacune de nos cellules se trouvent 24 chromosomes, dont deux chromosomes sexuels »*. En réalité, chaque cellule contient 23 paires de chromosomes, dont une paire de chromosomes sexuels.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Humilité, fragilité, responsabilité

« *Il y a vraiment des choses qui nous dépassent!* » Quelle leçon d'humilité donnée par Hubert Reeves quelques jours avant son décès (*p. 26*). Lui, le savant, le chercheur, le conteur, nous rappelait une fois de plus que nous, « poussières d'étoiles », avons toujours tant à admirer, à explorer, à comprendre. Surtout que, comme nous le rappelle Jean-Pierre Bibring (*p. 44*), rien n'est plus faux que l'idée selon laquelle — puisque les lois de l'Univers sont universelles — il est possible d'extrapoler à tout le cosmos ce que l'on connaît sur Terre et dans notre système solaire. Chaque corps — comme chaque être humain — est unique, fruit d'une histoire qui lui est propre. Aussi, notre choix des astres « les plus intrigants » est forcément subjectif et aucunement exhaustif. Mais parfaitement représentatif des merveilles qu'abrite l'Univers — ou dont on pense qu'il peut les abriter pour ce qui est des astres hypothétiques comme les déroutants trous blancs chers au physicien théoricien Carlo Rovelli (*p. 34*).

> « Notre choix des astres « les plus intrigants » est forcément subjectif et aucunement exhaustif. Mais parfaitement représentatif des merveilles qu'abrite l'Univers »

Hubert Reeves aimait *« rappeler à chacun à quel point [son] existence est précieuse »* (*p. 29*). Il savait la fragilité de la vie comme celle de la planète. Fragilité qui saute aux yeux quand des études génomiques révèlent que l'humanité a failli disparaître il y a 900 000 ans (*p. 78*). Et qui n'est pas moins évidente aujourd'hui devant l'avènement des armes hypersoniques, qui atteignent leur objectif avant que l'on n'ait pu réagir à leur lancement (*p. 46*).
Il est plus que jamais temps de comprendre notre monde pour bien agir. C'est ce que devront absolument faire les acteurs de la COP28 qui se tiendra ces prochains jours à Dubaï. Car comme le montre notre enquête, la reforestation censée compenser une part de nos émissions de gaz à effet de serre est loin d'être au rendez-vous (*p. 52*). Les trajectoires nationales de réduction des émissions qu'adopteront les 195 États signataires des accords de Paris devront intégrer ce constat. Si certaines choses continuent de nous dépasser, tout savoir nouveau donne de nouvelles responsabilités. ■

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, S. CARON, P. KALDY, J. DE MISCAULT, L. MORA, M. PARRA, A. VERNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24,
Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15,
Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux -
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », les messages « First Voyages -Balkan » et « First Voyages Croatie » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés , les encarts « Sophia Boutique -Atlas Historique Mondial » ainsi que « Les Restos du Cœur » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.. Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

MONDES DISPARUS

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

14 octobre 2023 — 16 juin 2024

Expédition en réalité virtuelle

GALERIE DE GÉOLOGIE & DE MINÉRALOGIE

Jardin des Plantes
Paris 5e
Réservation conseillée

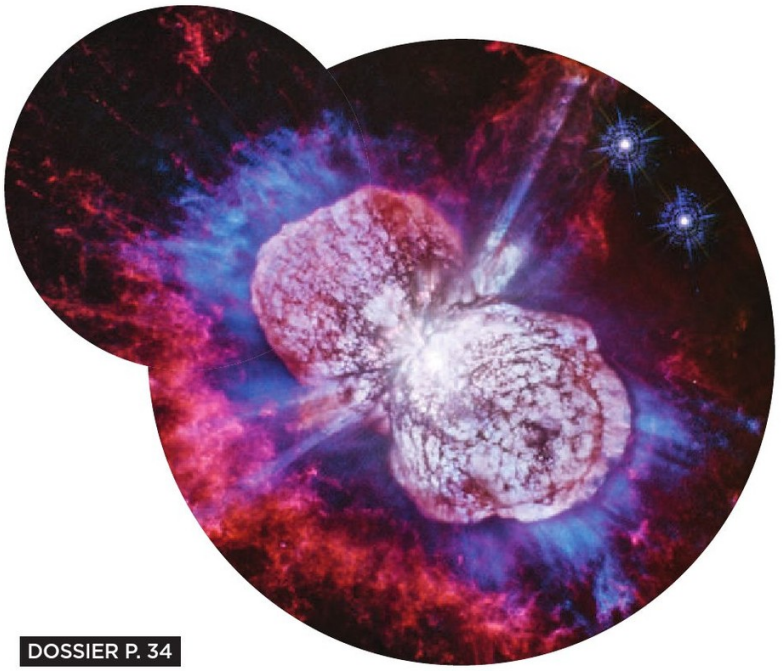
excurio
Expéditions Immersives

Libération · Sciences Avenir · Le Point · sncfconnect · Epsiloon media · france tv · inter

MNHN 2023 © MNHN / Excurio

SOMMAIRE

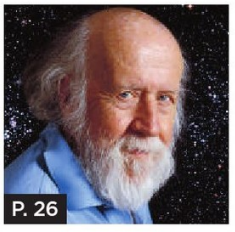
Sciences et Avenir - La Recherche / N° 922 / Décembre 2023



DOSSIER P. 34

Les astres les plus intrigants

Le plus grand, le plus véloce, le plus ancien, le plus magnétique... De nombreux corps célestes défient les lois de la physique et interrogent les scientifiques. Tour d'horizon de l'extraordinaire diversité des objets cosmiques.



P. 26

Hubert Reeves, un conteur d'étoiles disparaît

L'astrophysicien franco-canadien, décédé à 91 ans le 13 octobre, a émerveillé nombre de Terriens en leur contant le cosmos. Retour sur le parcours de cet amoureux du ciel et de la Terre.

P. 66

Poumons : la BPCO, une épidémie silencieuse

Troisième cause de mortalité dans le monde, cette maladie pulmonaire reste peu dépistée alors que le diagnostic est facile à établir. Des thérapies innovantes sont en développement.

P. 78

Quand l'humanité a failli disparaître

Une étonnante étude montre un très fort rétrécissement de la population dont est issue « Homo sapiens », il y a environ 900 000 ans en Afrique. Comment s'explique ce goulot d'étranglement ?

5 **Éditorial** par Dominique Leglu

6 **Courrier**

7 **Édito** par Mathieu Nowak

HOMMAGE

26 **Hubert Reeves, un conteur d'étoiles disparaît**

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** Les rayons X dévoilent la chimie secrète de la « Joconde » / Euclid lance sa recherche de l'énergie noire

46 **La course aux armes hypersoniques s'accélère**

50 **Le journal de l'IA : humain et machine, vers la grande confusion ?**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Le cargo à voiles d'Ariane 6 est arrivé à Kourou / Le chat joue du larynx pour ronronner

52 **COP28 : alerte sur les puits de carbone**

58 **Grand Océan 2023 : innover pour protéger l'océan**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Les ondes de la 5G n'affectent pas le cerveau / Le jogging, efficace contre la dépression

66 **Poumons : BPCO, l'épidémie silencieuse**

72 **Comment les rythmes circadiens régulent notre santé**

76 **Nutrition : poivre et piment, chaud devant**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Une IA « lit » un rouleau carbonisé d'Herculanum / Un géant assyrien revoit la lumière

78 **Quand l'humanité a failli disparaître**

83 **Ce rouleau qui innocente les templiers**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de décembre**

94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

ESA/NASA/SPL/SUCRÉ SALÉ - JOHN FOLEY/OPALE.PHOTO - KH FUNG/SPL/SUCRÉ SALÉ - OLIVIER-MARC NADEL POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

La composition de la couche préparatoire de l'œuvre, expérimentée par le savant, est très différente de celles des autres tableaux de la Renaissance.

Les rayons X dévoilent la chimie secrète de la « Joconde »

Une étude menée sur un micro-échantillon du célèbre tableau a permis de reconstituer la recette de la sous-couche utilisée par Léonard de Vinci, très rare pour l'époque.

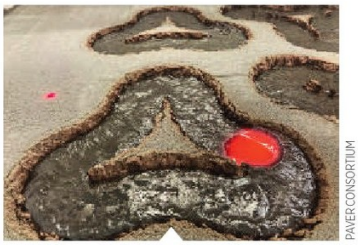
Le polymathe Léonard de Vinci n'était pas seulement peintre, sculpteur, inventeur, architecte ou anatomiste de génie. « *Il était aussi chimiste expérimentateur et la* Joconde *était un véritable laboratoire !* » souligne le CNRS. Le plus célèbre portrait au monde, chef-d'œuvre archétypal de la Renaissance italienne, a en effet pu être examiné aux rayons X du synchrotron de Grenoble. L'analyse d'un minuscule échantillon de quelques dizaines de millionième de mètre prélevé dans le coin supérieur droit du tableau a révélé dans la sous-couche de l'œuvre, outre des carbonates de plomb, 13 % en masse de plumbonacrite, un composé rare et instable constitué de plomb, de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Or, la présence de ce minéral suggère que Léonard de Vinci a utilisé un mélange d'huile au plomb très différent de ceux observés dans les peintures à l'huile de l'époque. Et qu'on ne retrouve pas, non plus, dans d'autres œuvres du maître comme *La Belle Ferronnière* et *La Vierge, l'Enfant Jésus et sainte Anne*. « *Dans les tableaux de Léonard de Vinci, aucune couche préparatoire n'apparaît ainsi identique. Il expérimentait à chaque fois des techniques et matériaux différents* », relève Victor Gonzalez, chimiste au CNRS et à l'université Paris-Saclay, premier auteur de l'étude.

Une huile au plomb accélérant le séchage

Les couches de préparation sont étalées directement sur les supports servant aux peintures — un panneau en bois de peuplier pour la *Joconde*. Elles permettent d'obtenir des surfaces blanches, lisses et homogènes sur lesquelles sont ensuite appliquées les couleurs. Bien qu'invisibles, ces sous-couches « *participent néanmoins au rendu optique d'un tableau et pourraient jouer un rôle dans les propriétés de séchage des couches de peintures surjacentes* », précise Victor Gonzalez. Grâce à l'analyse de l'échantillon, les chimistes ont ainsi reconstitué la recette la plus probable : une huile alcaline cuite avec de la litharge, autrement dit du monoxyde de plomb. Cette substance devait être particulièrement pâteuse, d'une viscosité semblable au miel. Et permettre, une fois mélangée à un pigment, d'étaler une couche épaisse et bien uniforme sur le panneau de bois. Elle devait posséder, enfin, de très bonnes propriétés de séchage. « *Quand Léonard de Vinci s'est lancé dans la* Joconde, avance Victor Gonzalez, *on peut imaginer qu'il voulait se mettre rapidement à l'ouvrage grâce à cette huile au plomb qui séchait vite.* » ■ **F. D.**

I. FAZLIC, M. COTTE & V. GONZALEZ

Des routes sur la Lune



PAVER CONSORTIUM

Un matériau simulant le régolithe lunaire a été fondu avec succès en laboratoire.

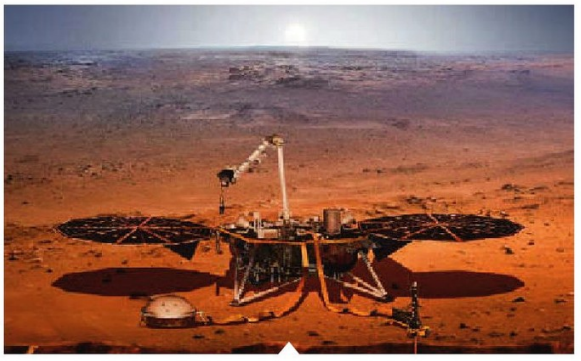
INGÉNIERIE Les matériaux servant à bâtir de futures infrastructures lunaires (routes ou pistes d'atterrissage) pourraient être fabriqués directement sur notre satellite naturel. Par exemple en faisant fondre les poussières (régolithe) très fines et abrasives qui recouvrent l'astre sélène en utilisant un laser ainsi qu'une lentille de 2 mètres de diamètre. **F. D.**

SOURCE : JENS GÜNSTER, UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE CLAUSTHAL, ALLEMAGNE.

Des embryons cultivés pour la première fois sur l'ISS

BIOLOGIE **Expérience inédite sur la Station spatiale internationale : des embryons de souris à deux cellules, expédiés congelés, y ont été cultivés avec succès durant quatre jours pour atteindre le stade de blastocyste à 16 cellules. Examinés à leur retour sur Terre, les embryons ne présentaient pas d'anomalie de développement sur le plan cellulaire ou génétique, preuve selon l'étude que la microgravité n'a pas d'effet significatif sur la différenciation initiale des embryons de mammifères.** **H. J.**

SOURCE : SAYAKA WAKAYAMA, UNIVERSITÉ DE YAMANASHI, JAPON.



NASA / JPL-CALTECH

InSight a enregistré les séismes de Mars de 2018 à 2022 (vue d'artiste).

L'origine du plus gros séisme martien a été identifiée

SISMOLOGIE Malgré des investigations d'une ampleur inédite, les scientifiques n'ont pas trouvé trace de la météorite qu'ils pensaient être à l'origine du plus puissant séisme (d'une magnitude de 4,7) enregistré sur Mars par InSight en 2022. Ce séisme a donc nécessairement une origine endogène liée à des contraintes mécaniques dans la croûte de la planète Rouge. De plus, l'activité géologique de Mars pourrait être bien plus importante qu'envisagé. **F. D.**

SOURCE : BENJAMIN FERNANDO, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI.

LES NOUVEAUX DÉFIS PLANÉTAIRES

Acteur de premier plan de la communauté spatiale européenne, Michel Friedling livre les clés pour comprendre les enjeux stratégiques, économiques et diplomatiques de ce terrain sans équivalent.

BOUQUINS

Euclid lance sa recherche de l'énergie noire

Le télescope spatial européen doit cartographier la structure à grande échelle de l'Univers.

ESA/EUCLID/EUCLID CONSORTIUM/NASA

Les 1000 galaxies de l'amas de Persée et, en arrière-plan, plus de 100 000 autres galaxies photographiées par Euclid.

Lancé en juillet, le télescope spatial européen Euclid a livré ses cinq premières images, d'une précision, d'une largeur et d'une profondeur de vue inédites ! *« Ces clichés sont le produit des premiers tests de performance des instruments dans le visible et l'infrarouge,* souligne Francis Bernardeau, physicien au CEA. *Cela donne une idée des capacités puissantes d'Euclid, dont l'objectif est de cartographier la structure à grande échelle de l'Univers.* » Particulièrement impressionnante, l'image de l'amas de Persée détaille les 1000 galaxies de l'amas et plus de 100 000 galaxies supplémentaires en arrière-plan, distantes pour certaines de 10 milliards d'années-lumière. Selon les astrophysiciens, Persée, l'une des structures les plus massives connues, ne peut s'être formée qu'avec une composante de matière noire. Le relevé complet du ciel d'Euclid sera 30 000 fois plus étendu que cette image, ce qui devrait permettre de mieux comprendre le rôle à grande échelle de la matière et de l'énergie noires. **S. R.**

SHANGHAI QI ZHI INSTITUTE/STANFORD UNIVERSITY

À VOIR SUR LE NET

Le quadrupède champion de course d'obstacles

ROBOTIQUE Course, reptation, roulade, saut, réception… Le robot quadrupède, mis au point par une équipe de l'université Stanford (États-Unis), est capable de négocier un parcours d'obstacles nécessitant la maîtrise d'une grande variété de techniques de locomotion. Le tout en n'étant guidé que par un système de vision par ordinateur. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

IL A DIT

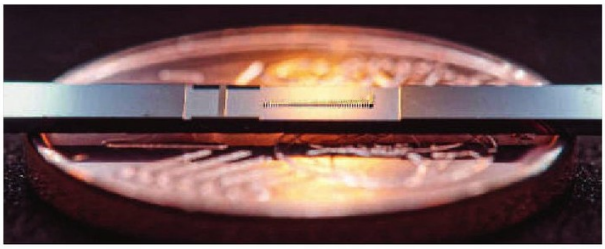
« Pour la première fois, une série de robots et d'algorithmes ont observé, identifié, puis communiqué avec un autre télescope pour confirmer la découverte d'une supernova »

Adam Miller, chercheur à l'université Northwestern (États-Unis) dont l'équipe a présenté un outil d'intelligence artificielle capable d'identifier automatiquement les explosions d'étoiles en fin de vie.

Un accélérateur de particules d'un demi-millimètre de long

INGÉNIERIE Des ingénieurs allemands ont conçu et mis en service le plus petit accélérateur de particules au monde. Cet « accélérateur d'électrons nanophotonique » (NEA) est 54 millions de fois plus petit que le LHC du Cern, à Genève. Sa micropuce abrite un tube à vide d'un demi-millimètre de long pour 225 nanomètres de large, dans lequel les électrons sont accélérés à une vitesse proche de la lumière. **H. J.**

SOURCE : T. CHLOUBA, UNIVERSITÉ FRIEDRICH-ALEXANDER D'ERLANGEN-NUREMBERG, ALLEMAGNE.



FAU/JULIAN LÜTZEL

Le dispositif tient presque entier sur une pièce d'un centime d'euro.

Des « nano-brillants » dans l'atmosphère d'une exoplanète

ASTROPHYSIQUE Le télescope spatial James-Webb a détecté des nanocristaux de quartz dans l'atmosphère de WASP-17b, une exoplanète située à 1300 années-lumière de la Terre. Cette silice pure (SiO_2) ne serait pas arrachée à la surface par les vents, mais se formerait dans l'atmosphère étouffante de cette « Jupiter chaude ». La mesure directe confirme l'acuité du télescope pour l'analyse d'atmosphères lointaines, l'un de ses principaux objectifs. F. N.

SOURCE : DAVID GRANT, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.

Une violente tempête solaire datée de -14 300 ans

GÉOSCIENCES Un pic de carbone 14 daté de -14 300 ans a été repéré dans les cernes d'arbres pétrifiés près de Gap (Hautes-Alpes). Cet isotope radioactif se forme dans la haute atmosphère sous l'effet des rayons cosmiques solaires, dont le flux augmente lors des caprices de l'étoile. L'événement décrit ici est environ deux fois plus important que les plus violents enregistrés depuis 15 000 ans. **J. I.**

SOURCE : ÉDOUARD BARD, AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ, FRANCE.

CÉCILE MIRAMONT

L'étude des cernes d'arbres pétrifiés a permis de dater l'événement.

0,84 femtomètre

La vraie taille du proton

PHYSIQUE Le rayon du proton, qui constitue le noyau des atomes avec le neutron, mesure 0,84 femtomètre ($1\ fm = 10^{-15}\ m$). Une nouvelle étude théorique confirme des mesures expérimentales réalisées depuis 2010, et qui avaient semé le trouble. Car des expériences antérieures indiquaient 0,88 fm. Une différence minime pourtant trop grande pour le modèle standard de la physique des particules. **F. N.**

SOURCE : D. DJUKANOVIC, UNIVERSITÉ MAYENCE, ALLEMAGNE.

TED STRYK

La sonde Juno de la Nasa a capturé des images de la surface de la lune de Jupiter avec une résolution inédite.

De nouvelles images de Io, bouillant satellite de Jupiter

ASTRONOMIE Le 15 octobre, la sonde Juno en orbite autour de Jupiter a survolé Io, le satellite aux centaines de volcans actifs. Elle a pu réaliser des clichés d'une qualité exceptionnelle. Ce sera l'occasion pour les scientifiques de les comparer avec ceux pris par la sonde Galileo entre 1995 et 2003. Le volcanisme intense qui secoue le satellite devrait avoir modifié notablement sa surface. **F. N.**

Grâce à sa propulsion vélique, le navire pourra économiser entre 15 et 40 % de carburant au cours de ses traversées entre l'Europe et la Guyane.

ESA-CNES-ARIANESPACE-ARIANEGROUP

Le cargo à voiles d'Ariane 6 est arrivé à Kourou

Le navire « Canopée » peut embarquer en une seule traversée transatlantique une fusée entière et son carburant.

Le 3 novembre, *Canopée* a accosté au port de Pariacabo en Guyane française, achevant ainsi son voyage transatlantique inaugural d'environ un mois. Long de 121 mètres pour 22 mètres de large, ce premier grand cargo à voile moderne a été conçu pour le transport des éléments du lanceur Ariane 6 depuis l'Europe jusqu'en Guyane, où se trouve le Centre spatial européen. *Canopée* est équipé de quatre mâts de 37 mètres de haut sur lesquels s'articulent des voiles à ailes rigides de 363 m² chacune. Pour atteindre une vitesse moyenne de l'ordre de 16 nœuds (29,6 km/h), ce navire hybride peut ainsi alterner moteurs et voiles selon les conditions de vent. Cela devrait permettre d'économiser entre 15 et 40 % de carburant diesel selon la saison. L'orientation des ailes est optimisée sur 360 degrés de manière automatique, grâce à un algorithme qui analyse les données météorologiques.

Entre 9 et 12 allers-retours par an

Lors de cette traversée, le cargo a embarqué des éléments de la partie supérieure du lanceur, dont la coiffe à Rotterdam (Pays-Bas), ainsi que des composants des boosters destinés au vol inaugural. Les différentes pièces d'Ariane 6 sont construites par plusieurs pays membres du programme Ariane. Au cours des neuf à 12 allers-retours par an qu'il effectuera en routine vers la Guyane, il devra donc rallier d'abord les ports de Brème (Allemagne) et de Rotterdam pour collecter l'étage supérieur et la coiffe, du Havre pour l'étage principal fabriqué aux Mureaux, et de Bordeaux pour les propulseurs et la jupe, avant de mettre le cap sur Pariacabo, proche de Kourou en Guyane. D'une capacité de charge de 5000 tonnes, il peut embarquer en une fois une fusée entière et son carburant, quand il fallait deux voyages pour transporter Ariane 5. Il pourra même, selon la place disponible, acheminer la charge utile satellitaire. Conçue pour concurrencer les Falcon 9 de l'américain SpaceX, Ariane 6 devrait faire son vol inaugural en 2024. ■ **S. R.**

6739 mètres

L'altitude record d'habitat pour un mammifère

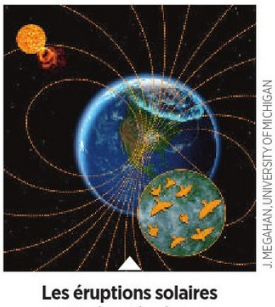
ZOOLOGIE C'est au sommet du volcan Llullaillaco, au Chili, qu'une équipe a piégé une souris à oreilles foliaires (*Phyllotis vaccarum*). Cela fait de ce rongeur le mammifère vivant aux altitudes les plus élevées de la planète, mais aussi celui dont l'aire de répartition est la plus variée, puisqu'il se trouve déjà au niveau de la mer dans le désert d'Atacama. **J. de M.**

SOURCE : JAY STORZ, UNIVERSITÉ DU NEBRASKA, ÉTATS-UNIS.

La météo spatiale influe sur la migration des oiseaux

ORNITHOLOGIE Les perturbations du champ magnétique de la Terre provoquées par les éruptions solaires ont une influence directe sur la migration des oiseaux. En utilisant des données de magnétomètres, une étude révèle une réduction de 9 à 17 % du nombre d'oiseaux migrateurs lors d'événements géomagnétiques importants. Et ceux qui migrent semblent éprouver plus de difficultés à naviguer. **H. J.**

SOURCE : ERIC GULSON-CASTILLO, UNIVERSITÉ DU MICHIGAN, ÉTATS-UNIS.



J. MEGAHAN, UNIVERSITY OF MICHIGAN

Les éruptions solaires perturbent le champ magnétique terrestre.

Pour Noël, offrez un forfait mobile à un prix qui, lui, n'est pas près de bouger

Achetez vos cadeaux chez Orange et tentez de gagner vos billets pour Paris 2024(2)

Offre soumise à conditions, valable à partir du 16/11/23 en France métropolitaine, sur réseaux et mobiles compatibles pour toute nouvelle souscription de la Série Spéciale 120 Go 5G sans engagement. 10 € de frais d'activation de la carte SIM.

5G : avec terminal compatible uniquement dans les zones déployées (réseau 5G en cours de déploiement). Débit variable selon les fréquences utilisées. Couverture détaillée et différenciée sur reseaux.orange.fr
(1) Disponible uniquement en association avec une offre Orange : internet, Open ou 4G Home (dans la limite de 5 forfaits par offre). En cas de résiliation de l'offre à laquelle la Série Spéciale est associée ou en cas de demande de suppression de l'association du forfait avec cette offre, le prix mensuel du forfait sera majoré de 5 € (soit 24,99 €/mois).
(2) 1000 billets pour Paris 2024 à gagner du 28/11/2023 au 03/01/2024 (dans la limite de 2 billets par personne). Billet d'une valeur allant de 24 € à 200 €. Participation soumise à condition d'achat en boutique Orange en métropole (produit ou souscription à une offre Orange, hors options), réservée aux clients particuliers. Tirage au sort le 17/01/2024. Pour les achats de produits, un justificatif d'achat vous sera demandé.

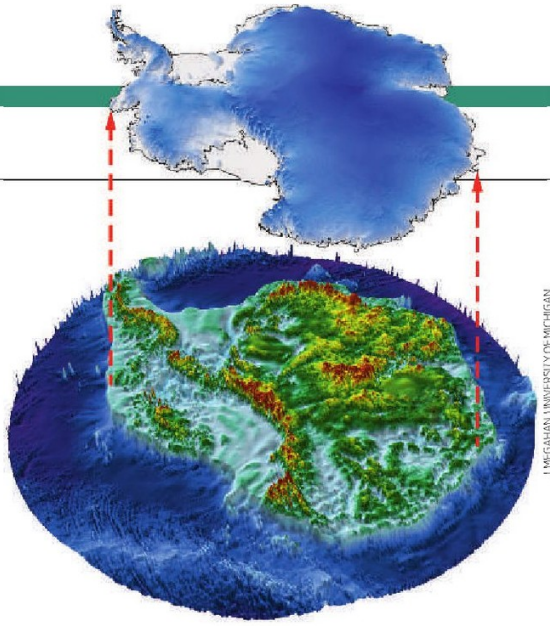
PARIS 2024 orange FOURNISSEUR OFFICIEL PARIS 2024

Chaque perruche a sa propre voix

ÉTHOLOGIE L'analyse de 5000 cris de perruches veuves *(Myiopsitta monachus)* par une intelligence artificielle entraînée à reconnaître les vocalisations montre qu'elles ont toutes, comme les humains, une empreinte vocale singulière. Elle permettrait aux perruches de se reconnaître. **A. S.-T.**

SOURCE : S. SMEELE, UNIVERSITÉ DE CONSTANCE, ALLEMAGNE.

NATUREPL/EBPHOTO



J. MCGAHAN, UNIVERSITY OF MICHIGAN

Carte du territoire de 32 000 km² tel qu'il apparaîtrait si on soulevait la calotte glaciaire. ►

Un paysage fluvial sous la calotte glaciaire de l'Antarctique

GÉOGRAPHIE Un véritable réseau de vallées fluviales dissimulées sous la calotte glaciaire vient d'être cartographié à l'est de l'Antarctique à l'aide de données satellitaires et de radars. Les auteurs estiment que ce relief date d'il y a 34 millions d'années, époque à laquelle il formait un paysage à ciel ouvert dans un environnement chaud, avant que ne s'imposent des conditions glaciaires. Selon eux, le changement climatique en cours pourrait, d'ici à 2100, libérer des glaces ces paysages disparus. **S. R.**

SOURCE : STEWART JAMIESON, UNIVERSITÉ DE DURHAM, ROroyaume-UNI.

10^{30} Le nombre de cellules sur la planète

BIOLOGIE Des calculs vertigineux publiés par une équipe de géochimistes estiment le nombre de cellules vivantes à un quintillon, soit 1 suivi de 30 zéros — 1000 milliards de milliards de milliards. Pour parvenir à ce résultat, les scientifiques ont combiné des estimations existantes du nombre de microbes présent dans les océans, le sol et le sous-sol. Et ils avertissent : la Terre ne pourrait pas nourrir plus de 10^{41} cellules. **H. J.**

SOURCE : P. CROCKFORD, INSTITUT WEIZMANN DES SCIENCES, ISRAËL.

EN DEUX MOTS

LITHIUM L'industriel Eramet a inauguré le 14 novembre à Trappes (Yvelines) son usine pilote de recyclage de batteries, préfiguration de l'usine qui ouvrira en 2025 à Dunkerque. **CORAIL** Une coalition de 45 pays (dont la France) s'est engagée à lever 12 milliards de dollars d'ici à 2030 pour la conservation et la restauration des récifs coralliens menacés. **CHASSE** Le tribunal administratif de Grenoble a débouté six associations de défense de l'environnement qui demandaient l'interdiction de la chasse à la marmotte en Savoie.

Le chat joue du larynx pour ronronner

Des chercheurs ont découvert que le félin peut ronronner sans solliciter ses muscles ou son système nerveux.

Une équipe de l'université de Vienne (Autriche) s'est penchée sur l'anatomie du larynx du chat pour comprendre comment un si petit animal pouvait émettre des sons à très basses fréquences (20 à 30 hertz). L'hypothèse que les ronronnements viennent de contractions musculaires déclenchées par des motoneurones (liant le système nerveux aux muscles) a longtemps prévalu, sauf qu'aucun centre du ronronnement dans le cerveau n'a été identifié. En menant des expériences sur des larynx de chats morts, l'équipe montre que cela n'est pas nécessaire : même excisés, les organes pouvaient émettre des oscillations auto-entretenues pour produire des sons typiques d'un ronronnement ! « *Nous suggérons que ce régime vibratoire se combine avec une spécialisation anatomique inhabituelle — des coussinets dans les cordes vocales — pour permettre au ronronnement d'être piloté par des mécanismes aérodynamiques* », notent les chercheurs. **L. M.**

H. SAUBER/PLAINPICTURE

Émis à de très basses fréquences, le ronronnement de l'animal pourrait provenir de coussinets situés dans ses cordes vocales.

ancv CHÈQUE-VACANCES CONNECT

Découvrez

le Chèque-Vacances Connect

et son application de paiement

Payer dans toutes les situations de paiement : sur place, à distance et en ligne

Régler vos dépenses au centime près, dès 20€ d'achat

Consulter votre solde en temps réel, en ligne, 24h/24, 7j/7

Vous n'êtes pas encore bénéficiaire CHÈQUE-VACANCES ?
Contactez votre CSE, COS, CAS, ou votre employeur !

EN SAVOIR + :
www.cheque-vacances-connect.com

HÉBERGEMENT, SÉJOURS & TRANSPORTS,
LOISIRS & CULTURE, LOISIRS SPORTIFS, RESTAURATION

ancv CHÈQUE-VACANCES

Établissement public et commercial - 326 817 442 RCS Pontoise - Immatriculation ATOUT France : IM095130003 - Garant : GROUPAMA ASSURANCE-CRÉDIT - Assurance RCP : MAIF - Crédits photos : ©Getty, ©Shutterstock. Réalisation Compos Juliot

QI YANG / GETTY IMAGES

Les fréquences de la 5G utilisées pour les téléphones portables se situent entre 3,4 et 3,8 GHz.

Les ondes de la 5G n'affectent pas le cerveau

L'exposition aux fréquences radio de 5e génération n'aurait pas d'impact sur l'activité cérébrale, selon une étude menée sur des volontaires coréens.

Les émissions électromagnétiques à hautes fréquences produites pour la téléphonie 5G n'ont pas d'effet à court terme sur le fonctionnement du cerveau. C'est la conclusion d'une étude menée par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), en collaboration avec l'Institut du cerveau à l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière, à Paris. Le déploiement de la 5G, déjà effectué en Corée du Sud et toujours en cours en France, doit permettre de multiplier par dix le débit d'informations transmises par les ondes et rendre presque instantanée la communication entre objets connectés. Dans l'étude, un champ électrique ambiant, mimant celui dû aux émetteurs de la 5G qui règne en milieu urbain coréen, n'a pas altéré les ondes cérébrales mesurées par électroencéphalographie (EEG) chez des volontaires exposés durant 25 minutes. « *C'est la première fois qu'une telle vérification est faite pour la 5G* », précise Brame Selmaoui, chercheur à l'Ineris qui a dirigé l'étude.

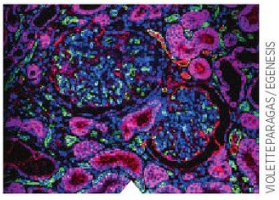
Moins d'effets à attendre que pour la 4G

Les scientifiques vont aussi effectuer des mesures des activités cardiaques, ainsi que des tests cognitifs et sur la mémoire. En 2015, la même équipe avait montré que les ondes de 900 MHz de la 2G utilisées par les premiers smartphones réduisaient l'amplitude des ondes cérébrales alpha mais d'une manière qui restait sans conséquence. Jusqu'à présent, les études d'effets physiologiques de la 4G d'une fréquence de 2,4 GHz n'ont rien montré de notable. « *Pour la 5G, dont la fréquence va de 3,5 GHz jusqu'à 27 GHz pour les véhicules autonomes, on peut s'attendre à moins d'effets car plus la fréquence des ondes est élevée moins elle pénètre dans les tissus* », précise le chercheur. Un effet cumulatif des différentes ondes ne semble pas non plus à craindre : une autre étude menée en Suisse a montré que l'intensité du champ électromagnétique n'avait pas changé en dix ans, malgré une multiplication par près de 20 des quantités de données transmises. Pour les téléphones portables, la 5G ne devrait donc pas beaucoup changer la donne. ■ **P. K.**

La greffe de rein porcin se précise

XÉNOGREFFE Des singes portant un rein de porc génétiquement modifié ont survécu un an en moyenne et jusqu'à deux ans dans le meilleur des cas, selon une étude de la société américaine eGenesis publiée dans *Nature*. Ce record inédit de durée pour une xénogreffe, normalement rejetée en quelques jours, marque un progrès important dans la possibilité de transplanter un jour des reins de porc chez des patients. **P. K.**

SOURCE : RANJITH ANAND, LABORATOIRE EGENESIS, ÉTATS-UNIS.



VIOLETTE PARAGAS / EGENESIS

Les cellules rénales modifiées transplantées sur un singe.

247

Le nombre de revues signataires appelant à considérer le réchauffement comme urgence de santé publique

Les plus grandes revues scientifiques de santé ont publié en même temps une lettre éditoriale appelant les décideurs politiques à reconnaître *« l'ampleur des conséquences de la crise environnementale sur la santé humaine »* et à faire du réchauffement un enjeu de santé publique à l'échelle mondiale. **H. J.**

SI NOS VINS SONT CONÇUS AVEC FINESSE

CE N'EST PAS
POUR LES BOIRE
AVEC EXCÈS

VA VINS ALSACE

Tant de personnalité(s) en responsabilité

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ, À CONSOMMER AVEC MODÉRATION

Au-delà de 4, notre cerveau compte différemment

NEUROLOGIE Un seul coup d'œil suffit à dénombrer précisément des unités jusqu'à quatre, mais au-delà, un mécanisme neuronal distinct prend le relais et rend l'exercice moins précis et spontané, montre une étude. L'analyse fine de l'activité électrique du cerveau de participants devant évaluer des groupes de points montre qu'à partir de cinq, le mécanisme de codage neuronal change de façon très nette. **C. G.**

SOURCE : ESTHER KUTTER, UNIVERSITÉ DE BONN, ALLEMAGNE.

SPITTA + HELLWIG/PLAINPICTURE

À partir de cinq, la capacité à dénombrer des objets se fait moins précise.

NAOKI MORITA/AFLO/PLAINPICTURE

44 % des participants ont amélioré leur état en quatre mois.

Le jogging, efficace contre la dépression

Une étude montre les bienfaits d'entraînements encadrés pour surmonter un diagnostic de dépression ou d'anxiété.

Une pratique sportive encadrée peut se révéler aussi efficace que la prise d'antidépresseurs. C'est ce que montre un essai clinique mené pendant quatre mois auprès de 141 patients atteints de dépression ou d'anxiété. Les participants avaient le choix entre des antidépresseurs ou un traitement axé sur le sport consistant en des entraînements supervisés deux à trois fois par semaine. Ces séances de jogging avaient lieu en groupe, à l'extérieur et avec des objectifs personnalisés pour chacun. Après seize semaines, le taux de réussite s'est révélé identique : 44 % des participants avaient surmonté leur diagnostic de dépression ou d'anxiété, et ce, peu importe l'approche. En revanche, 48 % dans le groupe de coureurs ont abandonné au cours de l'étude, contre 18 % des patients sous médicaments. **S. C.**

Vers un remède contre la rage

INFECTIOLOGIE Des chercheurs ont découvert un anticorps contre le virus de la rage capable de mobiliser le système immunitaire dans le cerveau de souris infectées et de les sauver, même après les premiers symptômes de la maladie. Un atout potentiellement important alors que les sérums antirabiques actuels ne bloquent le virus que si celui-ci n'a pas encore atteint le cerveau. **P. K.**

SOURCE : LAËTITIA DOUGUET, INSTITUT PASTEUR, FRANCE.

Rendre leur force aux muscles

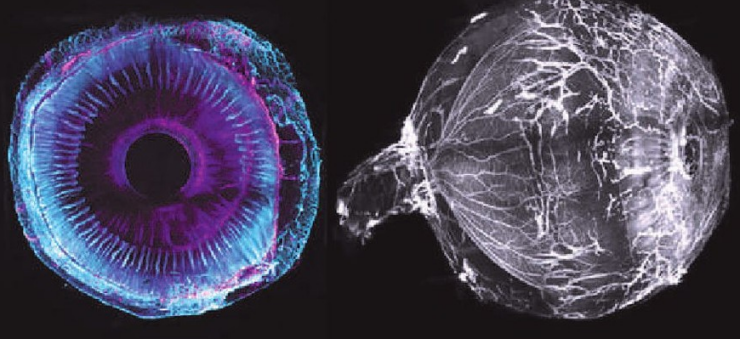
MYOLOGIE Avec la vieillesse ou dans certaines myopathies, les muscles perdent de leur force mais ce processus peut être inversé. Grâce à une molécule, la 15-PGDH, des chercheurs ont pu bloquer une enzyme qui dégrade l'innervation musculaire et redonner ainsi la force de leur jeunesse à des souris âgées. Ce produit pourrait aussi aider à réparer l'innervation motrice lors de traumatismes musculaires. **P. K.**

SOURCE : MOHSEN BAKOOSHLI, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

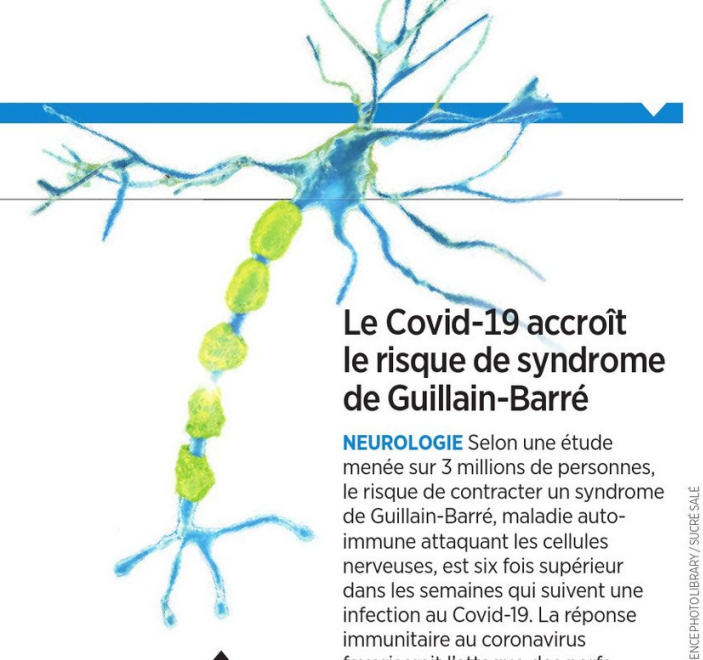
Des yeux rendus entièrement transparents

OPHTALMOLOGIE Première mondiale : une équipe franco-helvétique vient de réussir à rendre transparent un œil humain entier et va permettre de mieux comprendre les maladies ophtalmologiques. Tout repose sur des techniques dites de transparisation et de microscopie à feuillet de lumière effectuée à partir d'yeux de donneurs décédés. **S. R.-M.**

SOURCE : MARIE DARCHE, INSTITUT DE LA VISION, PARIS.



MARIE DARCHE/HOPITAL NATIONAL 15-20



KATERYNA KON/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRE SALÉ

La gaine de myéline (vert) facilitant les influx nerveux est attaquée par un Guillain-Barré.

Le Covid-19 accroît le risque de syndrome de Guillain-Barré

NEUROLOGIE Selon une étude menée sur 3 millions de personnes, le risque de contracter un syndrome de Guillain-Barré, maladie auto-immune attaquant les cellules nerveuses, est six fois supérieur dans les semaines qui suivent une infection au Covid-19. La réponse immunitaire au coronavirus favoriserait l'attaque des nerfs périphériques. Le risque diminuerait en cas de vaccin à ARN. **C. L.**

SOURCE : DENNIS BOURDETTE, UNIVERSITÉ D'OREGON, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

« Si les tests cliniques montrent qu'il est efficace, le Calixcoca sera le premier vaccin anti-cocaïne utilisé comme médicament »

Frederico Garcia, psychiatre à l'université fédérale de Minas Gerais (Brésil), dont l'équipe développe un vaccin thérapeutique contre l'addiction à la cocaïne. Le Calixcoca vise à faire produire des anticorps empêchant la drogue de susciter le plaisir dans le cerveau.

PHILDERA

Durant le concert, le public a accordé ses réponses physiologiques.

Quand la musique nous synchronise

PHYSIOLOGIE Une étude menée sur 132 spectateurs monitorés durant un concert de musique de chambre a observé entre les membres du public une synchronisation significative des mouvements, des fréquences cardiaque et respiratoire ainsi que de la conductivité électrique de la peau (qui indique l'éveil du système nerveux sympathique). Les traits de personnalités renseignés par ailleurs avaient toutefois une influence : les personnalités « agréables » ou « ouvertes » se synchronisaient plus facilement que celles classées « névrotiques » ou « extraverties ». **H. J.**

SOURCE : WOLFGANG TSCHACHER, UNIVERSITÉ DE BERNE, SUISSE.

www.lesproduitsdumois.com

PERTE DE CONCENTRATION ET DE MÉMOIRE ?

Les comprimés naturels **Cerveau Clair** apportent en quelques heures des vitamines et des nutriments aux zones de la concentration et de la mémoire du cerveau.

Ils contiennent de la L-théanine issue du Thé vert, des extraits de Grenade, de Pin maritime et de Noix, ainsi que des Vitamines B et de l'Iode, dont l'efficacité pour améliorer les performances mentales et les fonctions cognitives (mémoire, attention, concentration) a été démontrée dans de nombreuses études scientifiques.

Ils protègent également le cerveau du vieillissement et réduisent la fatigue.

Cerveau Clair tonifie et revitalise le cerveau pour aider à garder les idées claires !

■ En pharmacie - Boîte de 60 comprimés - ACL 2951863 - Convient aux végétaliens - Questions ? New Nordic répond au 01 85 12 12 12 (tarif local) www.vitalco.com

NOUVEAU : Reflux, sécrétions, irritations altèrent votre qualité de vie. MUCODISTIM, ENFIN UNE SOLUTION !

Raclements persistants dans la gorge, la Lithocétine® et le GABA agissent sur le pH de l'acidité gastrique et sur la réduction du relâchement du sphincter, permettant ainsi de contribuer à l'élimination des mucosités tout en luttant contre le reflux, l'Inflammation et l'irritation.
La quercétine, pour sa part, aide à combattre le phénomène allergique.
En complément, la Valériane, l'éleuthérocoque, et le magnésium agissent sur le stress et la tension musculaire.
Mucodistim va vous soulager !

A découvrir sur www.audistimpharma.com, en pharmacie et au tel. 05 56 69 13 84

INNOVATOUCH COSMETIC CRÈME BONNE MINE À L'ABRICOT

INNOVATOUCH Cosmetic lève le voile sur sa **nouvelle gamme Bonne Mine Abricot** double action pour un **coup d'éclat immédiat** et un **effet floutage léger instantané**.
La **Crème Abricot agit** en faveur d'une peau saine et oxygénée. Enrichie en **Huile de Noyau d'Abricot** et en **peptides de Lupin**, cette **émulsion légère** procure une sensation de **fraîcheur** dès son application. Effet Flash Bonne Mine 100%
■ En Pharmacie et Parapharmacie : 3701063810090.
AGETI France : 04 96 15 42 80.

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

EDUCELAB; VESUVIUS CHALLENGE

Écrit en grec, le mot « porphyras », signifiant « pourpre » (3e ligne en médaillon), a été décrypté sur ce rouleau vieux de 2000 ans.

Une IA « lit » un rouleau carbonisé d'Herculanum

Sur l'un des nombreux papyrus rendus illisibles par l'éruption du Vésuve, un mot complet a pu être déchiffré grâce à un algorithme. Une première.

Luke Farritor, un étudiant en informatique de l'université de Nebraska-Lincoln (États-Unis) de 21 ans, vient de relever l'un des plus grands défis archéologiques du siècle : déchiffrer les papyrus carbonisés d'Herculanum, conservés dans leur entièreté mais rendus illisibles par l'éruption du Vésuve, qui ensevelit la cité romaine en 79 après J.-C., à l'instar de sa voisine Pompéi. L'algorithme d'apprentissage automatique qu'il a mis au point a permis de détecter des lettres grecques sur plusieurs lignes d'un rouleau et de lire pour la première fois un mot entier : πορφυρας (*porphyras*), qui signifie « pourpre ». Un pas de géant qui pourrait permettre d'accéder enfin aux centaines de textes de la seule bibliothèque intacte de l'Antiquité gréco-romaine. *« Quand j'ai vu ces lettres, j'ai complètement paniqué. J'ai failli tomber à la renverse et pleurer »*, s'est ému le jeune homme.

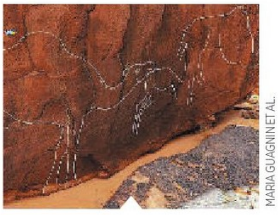
Des différences de texture minuscules

La prouesse a été accomplie dans le cadre du Vesuvius Challenge, une série de prix lancée il y a quelques mois par le professeur d'informatique Brent Seales, célèbre pour avoir « lu » un des manuscrits hébreux d'Ein Gedi (Israël), vieux de 1700 ans. Lui et son équipe avaient passé des années à mettre au point des méthodes pour dérouler virtuellement les couches extrêmement fines des rouleaux. En juin, les chercheurs ont donné un grand coup d'accélérateur en publiant de nouvelles images de rouleaux aplanis. Parmi elles, un scan où les différences de textures entre papyrus et encre étaient plus prononcées qu'ailleurs, au point d'être visibles à l'œil nu. Ces centaines de papyrus carbonisés ont été exhumés entre 1752 et 1754 d'une villa appelée depuis villa des Papyrus. Cuits par la chaleur des coulées destructrices, ces rouleaux n'ont pas été calcinés puisqu'ils n'ont jamais été au contact des flammes. Une chance que les chercheurs tentent depuis longtemps d'exploiter, même si divers essais d'écorçage ont réduit en poussière certains de ces inestimables trésors. ■ **M. B.**

IL A DIT

« Ce gène hérité de Neandertal code une protéine qui constitue une porte d'entrée pour l'afflux nerveux transmettant le stimulus douloureux de la moelle épinière au cerveau. »

Pierre Faux, chercheur en génétique des populations, dont l'équipe a montré que les personnes porteuses de trois variants génétiques hérités de Neandertal sont plus sensibles à certains types de douleur.



MARIA GUAGNIN ET AL.

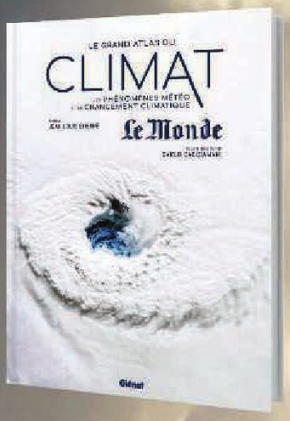
Les camélidés ont été gravés il y a environ 8000 ans.

Une espèce disparue de dromadaire gravée en Arabie saoudite

ARCHÉOLOGIE Découvertes dans un affleurement rocheux dans le désert du Nefoud (Arabie saoudite), de fines gravures ont pu être identifiées comme des représentations grandeur nature d'une espèce disparue de dromadaires sauvages. Tracées à l'aide de morceaux de roches dures il y a environ 8000 ans, les silhouettes présentent différents styles, suggérant qu'une succession de nomades y aurait contribué. **M. P.**

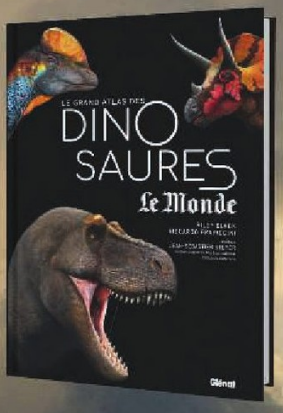
SOURCE : MARIA GUAGNIN, INSTITUT MAX-PLANCK DE GÉOANTHROPOLOGIE, ALLEMAGNE.

LES BEAUX LIVRES DE TOUS LES SAVOIRS

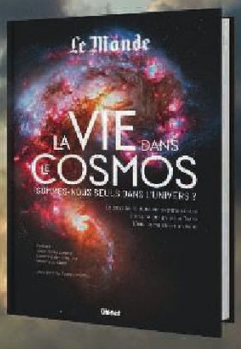


LE GRAND ATLAS DU CLIMAT
Un enjeu planétaire
Préface de Jean-Louis Etienne
Olivier Nouaillas
En librairie le 15 novembre

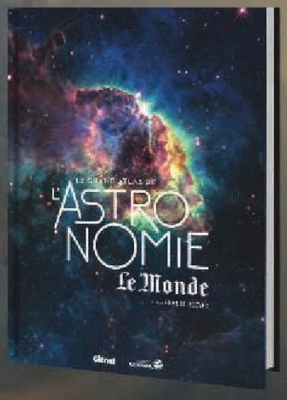
LES FORÊTS DU MONDE
Préface Bruno David
Jérôme Chave
Sassan Saatchi
Herman Shugart
Peter White
En librairie



LE GRAND ATLAS DES DINOSAURES
Préface Jean-Sébastien Steyer
Riley Black
Riccardo Frapiccini
En librairie



LA VIE DANS LE COSMOS
Préface de Jean-Pierre Luminet
Juan Antonio Aguilera Mochón
En librairie



LE GRAND ATLAS DE L'ASTRONOMIE (8e ed)
Collectif
Préface Hubert Reeves
En librairie

© Matthew T Rader

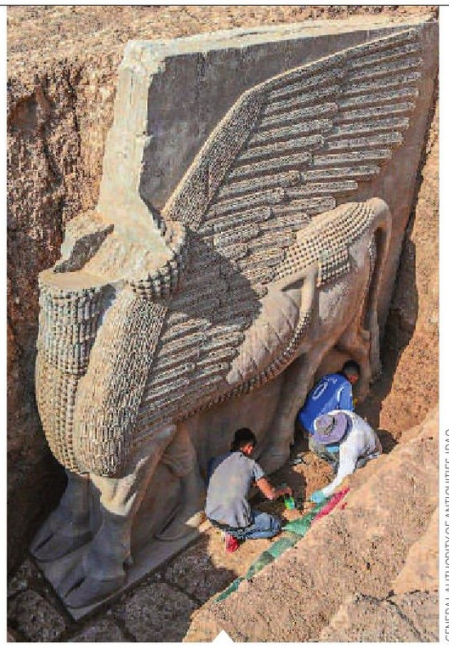
COLLECTION RÉFÉRENCE : 32 TITRES DISPONIBLES

Glénat
www.glenat.com

Un géant assyrien revoit la lumière

Cette sculpture a été redécouverte après avoir été cachée en 2014 pour échapper aux destructions du groupe État islamique en Irak.

Un gigantesque « lamassu », génie protecteur emblématique de l'Empire assyrien, a été redécouvert mi-octobre dans la périphérie de Mossoul, en Irak, par une équipe d'archéologues franco-irakiens. Mesurant 3,8 mètres de haut et 3,9 mètres de large, celui-ci avait été caché en 2014 par les habitants de Khorsabad, village où il trônait, dans le but de le protéger des destructions du groupe État islamique. Mais il n'avait jamais été documenté ni entièrement mis au jour. Cette divinité hybride mi-homme mi-taureau ailé se dressait au VIIIe siècle avant J.-C. dans le palais du roi Sargon II, dans l'antique Dûr-Sharrukîn. Malheureusement pillée et morcelée dans les années 1990, sa tête se trouverait aujourd'hui dans les collections du British Museum de Londres (Royaume-Uni). Il n'en reste pas moins l'un des lamassu les mieux conservés jamais retrouvés jusqu'ici. **M. B.**

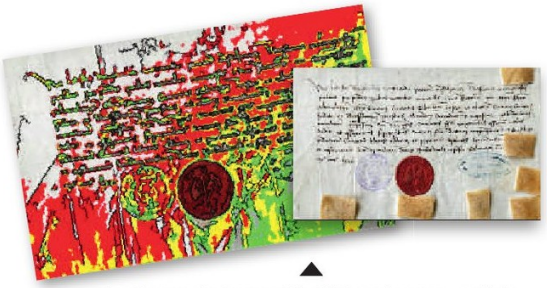


GENERAL AUTHORITY OF ANTIQUITIES, IRAQ

Ce « lamassu » en albâtre, taureau ailé à tête humaine de 3,8 m de haut et 18 tonnes, date d'environ -2700 ans.

EN DEUX MOTS

DINOSAURE Une nouvelle espèce de sauropode *(Garumbatitan morellensis)*, datée de 122 millions d'années, a été identifiée à Morella, en Espagne. **ALIMENTATION** Selon une étude, la consommation d'algues et de plantes aquatiques était courante jusqu'au Moyen Âge dans les populations des littoraux européens. **ANTIQUITÉ** Une nouvelle analyse des marbres d'Elgin du Parthénon d'Athènes au British Museum de Londres a mis en évidence l'utilisation d'un bleu égyptien et d'un colorant violet pour rehausser leur couleur il y a 2500 ans.



PITTALÀ ET AL., ANAL. CHEM., 2023

Les lettres écrites par Vlad l'Empaleur au XVe siècle suggèrent qu'il souffrait d'hémolacrie.

Dracula pleurait des larmes de sang

CHIMIE Une équipe de chimistes a analysé les substances présentes à la surface de trois lettres écrites par Vlad III dit l'Empaleur, prince roumain du XVe siècle qui inspira à Bram Stoker son personnage du vampire Dracula. Des travaux inédits suggèrent que le personnage à la réputation sanguinaire était probablement atteint d'hémolacrie, une maladie rare caractérisée par des larmes de sang, en accord avec sa légende. **M. B.**

SOURCE : VINCENZO CUNSOLO, UNIVERSITÉ DE CATANE, ITALIE.

396

Le nombre de forts romains découverts par des satellites espions

ARCHÉOLOGIE **Une équipe a utilisé des images prises par des satellites espions des années 1960 et 1970, désormais déclassifiées, pour réévaluer l'une des premières études archéologiques aériennes jamais réalisées. Elle révèle 396 forts romains inconnus dans ce qui est aujourd'hui la Syrie et l'Irak.** **H. J.**

Des « espadrilles » vieilles de 6200 ans en Espagne

ARCHÉOLOGIE Les plus anciens objets tissés connus d'Europe ont été mis au jour dans la grotte des Chauve-Souris, en Andalousie (Espagne). Outre des paniers, des nattes — et autres cordes réalisés en fibres d'alfa — proche du jonc ou du raphia —, de nombreuses sandales tissées il y a 6200 ans ont été découvertes. Certaines vanneries datent même de 7950 à 7360 avant notre ère, preuve que les chasseurs-cueilleurs du mésolithique maîtrisaient déjà à la perfection le tressage en fibres végétales. **S. de L.**

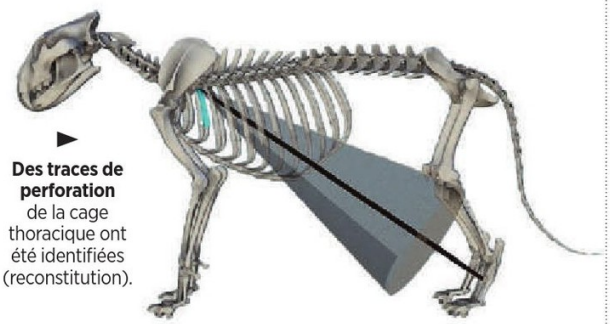
SOURCE : F. MARTÍNEZ-SEVILLA, UNIVERSITÉ D'ALCALÁ DE HENARES, ESPAGNE.

MUTERMUR PROJECT

Les sandales néolithiques tissées en fibres d'alfa.

Victoire française autour d'une épave en Floride

PATRIMOINE La France a remporté la bataille judiciaire qui l'opposait à un Américain chasseur de trésors autour du galion français *La Trinité* englouti en 1565 au large de la Floride. Sa souveraineté sur le navire a été reconnue par une cour fédérale. L'épave, qui gît par moins de 10 mètres de fond, renferme encore trois canons en bronze, une inestimable colonne en marbre portant le blason du royaume de France et sans doute encore bien des trésors officieux. **M. B.**



G. RUSSO ET AL.

Des traces de perforation de la cage thoracique ont été identifiées (reconstitution).

Les néandertaliens chassaient bien le lion des cavernes

ANTHROPOLOGIE Il y a 48 000 ans, des néandertaliens ont porté un coup fatal à un vieux lion des cavernes pour le manger. Une nouvelle analyse d'un squelette découvert en 1985 sur le site de Siegsdorf, en Allemagne, révèle en effet des traces de blessures par une lance en bois. Il s'agirait du premier exemple de chasse et de dépeçage de ces gros félins par les cousins de *sapiens*. **S. de L.**

SOURCE : GABRIELE RUSSO, UNIVERSITÉ DE TÜBINGEN, ALLEMAGNE.

Une guêpe aux drôles d'antennes

PALÉONTOLOGIE Le fossile d'une micro-guêpe d'à peine 1,3 mm de longueur a été figé dans de l'ambre de Birmanie, vieux de 100 millions d'années. L'insecte est un parasitoïde qui se distingue par la présence de deux bulbes à l'extrémité des antennes. Selon les spécialistes, il pourrait s'agir de graines de plantes, de sécrétions végétales ou d'œufs de cochenille dont la présence est attestée dans le même échantillon. **J. I.**

SOURCE : GEORGES POINAR, UNIVERSITÉ D'ÉTAT D'OREGON, ÉTATS-UNIS.

POINAR ET AL.

Le fossile de 1,3 mm de long possède de mystérieux bulbes au bout de ses antennes.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

GILLES ROLLE/REA - NASA - L. BALLESTA - PCARRIL/LEEMAGE/AFP

MATHÉMATIQUES

La réforme du lycée général en question

Pour le collectif Maths & Sciences et ses partenaires, la réforme du lycée réintégrant les mathématiques au tronc commun présente des failles majeures impossibles à combler avec l'architecture actuelle. Une tribune à lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/47m8FCS

AUDIO

Tous les articles du site à écouter

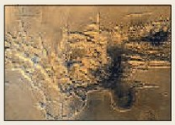
Depuis le mois d'octobre, l'intégralité des articles du site Web de *Sciences et Avenir* se dévoilent à l'écoute. À consommer sans modération ! www.sciencesetavenir.fr

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Vue imprenable sur les canyons martiens



Dans une vidéo époustouflante, la sonde Mars Express révèle les paysages de *Noctis Labyrinthus* (Labyrinthe de la nuit), une région marquée par un volcanisme intense. tinyurl.com/sciav922mars

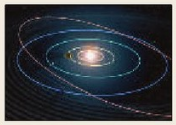
5 minutes

Des photos célébrant la nature sauvage

Découvrez le diaporama des lauréats du concours photo Wildlife Photographer of the Year, dont le 1er prix a été décerné à Laurent Ballesta. tinyurl.com/sciav922diapos

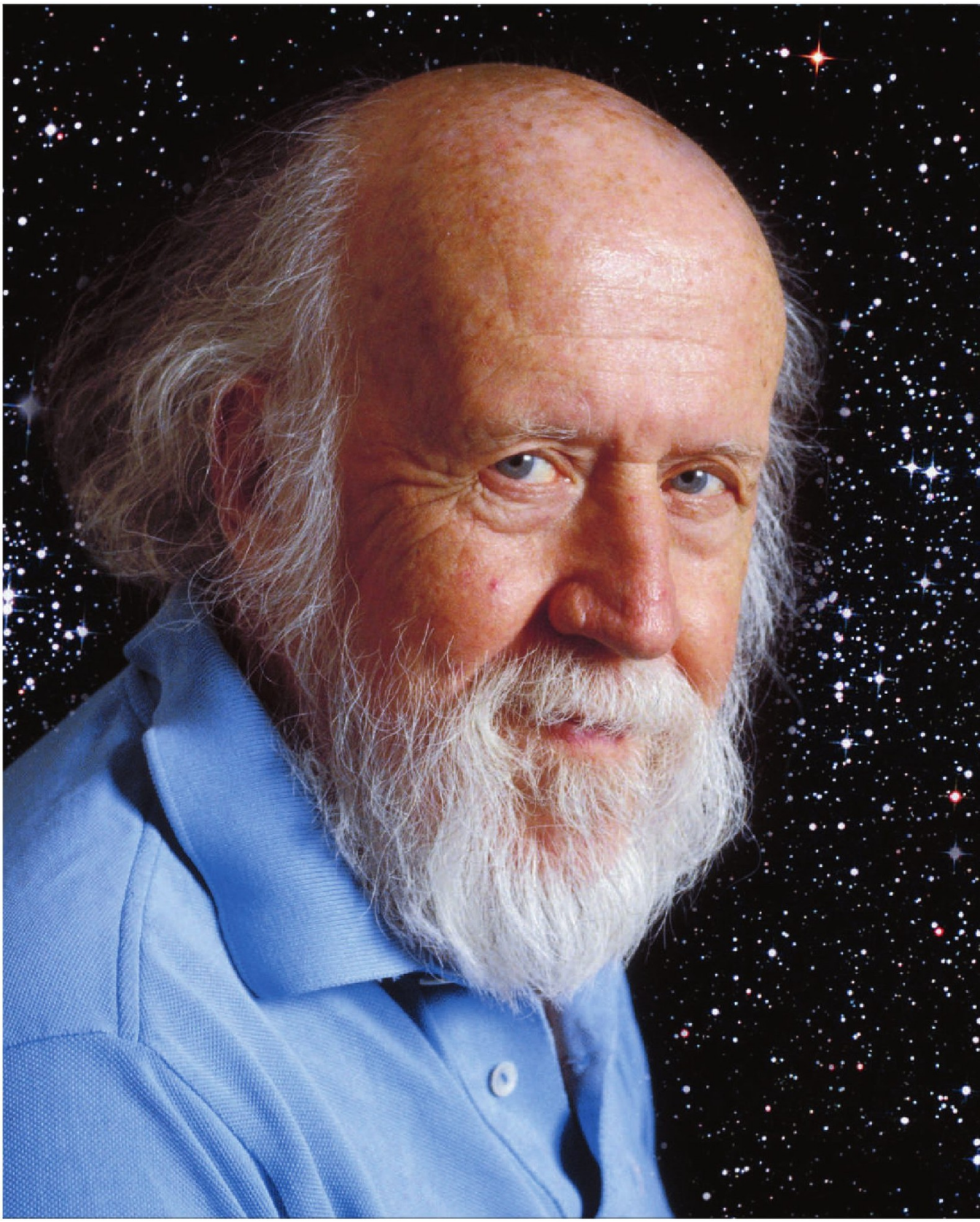
10 minutes

Une théorie de la gravitation modifiée validée



Selon deux physiciens, les indices pointant vers l'existence d'une 9e planète bien au-delà de Neptune pourraient être une preuve en faveur d'une loi de la gravitation modifiée. tinyurl.com/sciav922gravitation

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook



© JOHN FOLEY/OPALE.PHOTO

Hubert Reeves

Un conteur d'étoiles disparaît

L'astrophysicien franco-canadien Hubert Reeves, décédé le 13 octobre à l'âge de 91 ans, a fait s'émerveiller des millions de Terriens en leur contant le cosmos. Retour sur le parcours et les engagements de ce grand scientifique amoureux du ciel comme de la Terre.

Par Dominique Leglu

C'était un œil aussi bleu que l'azur, une barbe fleurie et surtout une voix. Un parler grasseyant venu de la Belle Province, avec qui les mots d'étoiles, de trous noirs prenaient littéralement corps. Le cosmos était son ami, il nous a tous rendus amis du cosmos. Mieux, il nous a tous métamorphosés en « *poussières d'étoiles* ». Et a réussi à en convaincre beaucoup — qu'aurait pensé Blaise Pascal ? — que « *nous faisons partie de l'histoire cosmique* ». Avec Hubert Reeves, les espaces infinis avaient trouvé leur voix et semblaient ne plus pouvoir effrayer grand monde. C'est de nous que parle l'Univers, insistait-il. Il conseillait aux enseignants de faire découvrir aux enfants leurs liens intimes avec l'Univers. C'est ce qu'il contait à *Sciences et Avenir* lors d'une longue interview en 2009, tout comme il l'avait fait de multiples fois, inlassablement, avec gentillesse et la pointe d'humour indispensable. Parce qu'il aimait ça.

Il aimait le cosmos, les oiseaux et son public. Ce dernier le lui rendait au centuple. On se souvient de cette conférence à Blois (Loir-et-Cher), lors de l'année de l'astronomie, où la salle avait été prise d'assaut — elles étaient toujours prises d'assaut. Les auditeurs écoutaient religieusement son propos sur les univers parallèles *(lire* S. et A. *n° 778, décembre 2011)*. Puis vint ce moment inévitable post-conférence où un groupe s'approcha, le sommant de « *dire la Vérité. Dire si la Vie a un sens ou non ? Et Dieu* » dans tout ça ? À ces questions, il rétorquait de ne pas chercher du « *prêt-à-penser* » et de ne « *pas placer les scientifiques à la place des curés* ».

Il faisait partie de ces astrophysiciens pour qui le ciel est à la fois « *lieu d'émerveillement et de rationalité* ». Cela aussi, il l'avait écrit très tôt, en 1981, dans cet ouvrage qui l'a rendu célèbre, au beau titre inspiré de Paul Valéry, *Patience dans l'azur.* Le livre, rien que de cohérent,

Le célèbre scientifique avait contribué à de nombreux numéros de « Sciences et Avenir » (ici, de gauche à droite : en août 2004, octobre 2006 et janvier 2014).

est « *dédié à tous ceux que le monde émerveille* ». En couverture, les petits points bleus et blancs du quasar 3C 273 donnent le ton. Il faisait aussi des paris, quand on voulait en savoir plus sur la vie, ce qu'il exprimait dans le numéro anniversaire des 70 ans de *Sciences et Avenir* (*n° 849, novembre 2017*, « L'Univers a une histoire ») : « *Pour l'heure, faute d'avoir détecté la vie sur d'autres planètes que la nôtre, nous ne pouvons qu'émettre des opinions. Personnellement, j'adhère à l'hypothèse que d'autres formes de vie existent bel et bien.* »
Arrivé en France seize ans auparavant, depuis l'autre côté de l'Atlantique, Hubert Reeves avait, lors de cette première publication grand public, instauré un ton nouveau. Peu de scientifiques français, à l'époque, auraient osé se faire poète. Peur des pairs ? Mépris du mélange des genres ? Depuis, beaucoup se sont mis dans les pas d'Hubert, osant dire leur propre émerveillement et dérouler leur réflexion propre. Sans craindre les foudres d'un rationalisme étroit qui, au nom des équations, bannirait les métaphores et le plaisir de la langue. Ce premier livre, présenté à plusieurs maisons d'édition, lui ouvrit les portes du Seuil, en connivence avec le physicien Jean-Marc Lévy-Leblond, alors directeur de la collection « Science ouverte ». Bonne pioche. Tous les livres d'Hubert Reeves furent ultérieurement des best-sellers.

Spécialiste des géantes rouges

Jadis, à 28 ans, il avait obtenu un doctorat en astrophysique nucléaire à l'université Cornell, sur la côte est des États-Unis. Il avait pu côtoyer des esprits aussi géniaux que l'étincelant Richard Feynman, prix Nobel de physique en 1965, ou Hans Bethe, prix Nobel de physique en 1967, connaisseur de la fission et de la fusion nucléaire. Avec son patron de thèse Edwin Salpeter, Hubert Reeves avait acquis la connaissance des processus fondamentaux de la matière, notamment la création de cette dernière au sein des étoiles, celle-là même qui nous constitue ou constitue notre planète et le Système solaire. Les étoiles, au-delà de l'hydrogène et de l'hélium apparus après le Big Bang, concoctent en effet pléthore d'éléments fondamentaux de notre univers d'aujourd'hui, avant que d'exploser (pour certaines) en supernova et « ensemencer » l'Univers.
Des années après cet apprentissage, il racontera par exemple « *la naissance miraculeuse du carbone* » au cœur de l'étoile : « *Cet enfant chéri de la nature, né d'un accouchement difficile, ne sera pas ingrat […] Il sera le grand héros de l'évolution chimique et de l'évolution biologique.* » Spécialiste des « géantes rouges », il avait une tendresse infinie pour ces éléments et les lieux qui les

MARC SOYEZ/ALAMO

VERBATIM

ANNA ALTER

JOURNALISTE, ANCIENNE COLLABORATRICE DE « SCIENCES ET AVENIR » ET AMIE D'HUBERT REEVES*

Ses derniers mots : « Il y a des choses qui nous dépassent »

“Hubert Reeves était mon maître et mon ami. Dans le milieu de la recherche, sa personnalité haute en couleur tranchait et ses formidables talents de conteur se traduisaient par des ventes explosives en librairie. Pendant près de quarante ans nous avons échangé à cœur ouvert sur les sujets les plus pointus et les hors-sujets. Une semaine avant son décès, alors qu'il était très affaibli et placé sous oxygène à l'hôpital, il a encore eu la force de s'attaquer à une question qui lui était posée à l'issue de chacune de ses conférences : et Dieu dans tout ça ? Une interrogation récurrente qu'il ne balayait pas d'un revers de la main. Son analyse était d'ailleurs peu orthodoxe : « *Anna [m'a-t-il dit ce jour-là], nous n'avons de preuve, ni dans un sens, ni dans l'autre, la question reste ouverte.* » L'esprit toujours en alerte, il a poursuivi : « *On vient de découvrir des particules qui communiquent à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui est contraire à tout ce qu'on sait ! Il y a vraiment des choses qui nous dépassent…* »
Avant de le quitter, j'ai photographié ses mains tendues vers le ciel. Hubert Reeves avait fait déjà tellement de faux départs vers les étoiles, que je n'ai pas imaginé une fraction de seconde que nous nous voyions là pour la dernière fois.”

* Elle a notamment écrit avec lui *L'Univers, ce qu'on ne sait pas encore, Le Soleil, ce qu'on ne sait pas encore* (éditions Le Pommier).

LA FERME DES ÉTOILES

Formidable vulgarisateur, Hubert Reeves était le parrain du festival d'astronomie organisé par la Ferme des étoiles à Fleurance (Gers).

avaient vus naître : « *Il n'est pas excessif de considérer les fours centraux des géantes rouges comme des hauts lieux de la fertilité cosmique.* » Avec lui, le grand public allait comprendre que le cosmos a connu une formidable évolution, depuis le Big Bang jusqu'à nous. Il s'émerveillait que « *les deux histoires* » — celle de la biologie, celle de l'astrophysique — soient parallèles et parlent toutes deux « *d'origine et d'évolution* ». Dans son ouvrage joliment titré *Oiseaux, merveilleux oiseaux*, librement inspiré de Baudelaire, il trouvait même matière à « *plus impressionnant encore : ces deux histoires s'emboîtent l'une dans l'autre* »! Cet ouvrage, il l'avait publié en 1998 après avoir traversé une période douloureuse et de graves problèmes de santé, où une « *grande lassitude [l'avait] envahi. L'idée de ma mort me devient douce* », avait-il même écrit dans la préface. Mais une nuit d'insomnie, a-t-il également relaté, « *je lève les yeux vers la fenêtre et reconnais les étoiles de la Grande Ourse. Je sens monter en moi une intense émotion et m'entends dire : "Je suis en vie" […] L'idée de la mort ne m'a plus jamais effleuré.* »

Dialogue entre deux infinis

Cela ne l'empêchait pas de conserver espoir. « *Il n'est jamais trop tard pour agir* », répétait-il toujours. Acceptant de répondre à de multiples interrogations — même sur les extraterrestres ! —, il ne voulait, en effet, jamais désespérer ceux qui venaient l'écouter. C'est qu'il s'était lui-même beaucoup interrogé. Sur le dialogue entre les deux infinis, infiniment petit et infiniment grand, et de l'humain avec eux, comme Pascal, jadis : « *Par l'espace l'Univers me comprend et m'engloutit comme un point ; par la pensée, je le comprends.* » Il s'était interrogé sur la croissance de la complexité, ses prouesses et la question : pourquoi l'organisation plutôt que le chaos ? Il s'était interrogé sur « *convergence* » et « *contingence* », ces notions chères aux biologistes évolutionnistes. Il s'était interrogé sur « *l'aptitude à apprendre* »…

> “Par l'espace l'Univers me comprend et m'engloutit comme un point ; par la pensée, je le comprends ”

Il en était venu à oser formuler « *d'intimes convictions* », proches d'une vision aristotélicienne du monde : « *J'aime voir,* écrivait-il, *dans la poussée aveugle de la pierre en fusion une image du comportement de la nature tout au long de l'histoire du cosmos. Poussée par ce qu'on pourrait appeler (faute d'un meilleur terme) un puissant levain cosmique, la matière tend à atteindre des états de plus en plus structurés.* » Avec son « *levain cosmique* », il se disait prêt à « *faire feu de tout bois.* […] *Nous le portons en nous,* écrivait-il. *Sans se lasser de rappeler à chacun à quel point [son] existence est précieuse* ». ■

LOIC VENANCE / AFP

L'astrophysicien aimait les échanges. Il avait créé avec la violoniste Karine Lethiec un spectacle mariant musique et cosmos (ici en 2016).

Le grand scientifique qui fut notre maître

Jean Audouze, directeur de recherche émérite au CNRS, ancien directeur de l'Institut d'astrophysique de Paris et Michel Cassé, ancien directeur de recherche au CEA et membre du Cercle d'astrophysique de Fleurance, racontent les percées scientifiques majeures dues à Hubert Reeves.

Hubert Reeves est certainement l'un des scientifiques les plus célèbres de France et du monde. Il dut sa flatteuse réputation à ses nombreux ouvrages de vulgarisation qui tous ont eu un retentissement considérable. Ce fut un conférencier extraordinaire et il est quasiment impossible de dénombrer les émissions de radio ou de télévision, les films, les festivals tels que celui de l'Espace à Fleurance dans le Gers, auxquels il a participé. Si « la Nuit des étoiles » eut le succès qu'on lui reconnaît, c'est indéniablement grâce à sa participation éblouissante dès le début de celui-ci.

Cela étant, Hubert Reeves n'est pas seulement ce vulgarisateur célébrissime. Pour nous deux qui avons été ses élèves puisqu'il dirigea, entre autres, nos deux thèses, Hubert est un immense scientifique. Il fut étudiant de thèse de Edwin Salpeter et de Hans Bethe à l'université Cornell, à Ithaca, aux États-Unis, et sa thèse soutenue en 1960 consista à étudier la formation des éléments chimiques compris entre le néon et le soufre à partir de la fusion du carbone et de l'oxygène dans les étoiles géantes et supergéantes. Après un bref passage à l'Université libre de Montréal, au Canada, il vint en Europe, d'abord en Belgique, à Bruxelles pendant l'année 1964-1965 puis en France dès la rentrée 1965.

> “Hubert est à l’origine de l’explication de la formation des éléments légers, lithium, béryllium, bore, qui devint grâce à lui canado-française et un peu suisse ”

En tant que maître puis directeur de recherche au CNRS, il fut d’abord accueilli au Centre de spectroscopie nucléaire et de spectroscopie de masse, le CSNSM d’Orsay, dirigé alors par le physicien René Bernas, puis en 1966 dans le département d’électronique physique du CEA à Saclay, dirigé par Jacques Labeyrie et Lydie Koch. Rappelons qu’en 1957, un quatuor d’astrophysiciens anglais et américains (Geoffrey et Margaret Burbidge, William A. Fowler et Fred Hoyle) publièrent le fameux article B^2FH (le sigle étant formé des initiales de leurs noms) dans la prestigieuse revue scientifique *Review of Modern Physics*, fournissant une explication à la formation dans les étoiles de tous les éléments chimiques du tableau de Mendeleïev, à l’exception des plus légers (le lithium, le béryllium et le bore) et de l’isotope lourd de l’hydrogène, le deutérium. L’un d’entre eux, William Fowler, avec lequel nous eûmes la chance l’un et l’autre de travailler au Kellogg Radiation Laboratory du Caltech à Pasadena, aux États-Unis, recevra seul le prix Nobel de physique en 1983 — une grande injustice car au moins Fred Hoyle aurait dû être associé à ce prix prestigieux.

La nucléosynthèse stellaire

On peut dire qu’Hubert évita que l’explication de la formation de tous les éléments chimiques de la nature soit purement anglo-saxonne puisqu’il est à l’origine de celle des éléments légers, lithium, béryllium, bore (il contribua un peu plus tard à celle du deutérium) qui devint grâce à lui canado-française et un peu suisse. En effet, il entreprit entre 1965 et 1971 de déterminer l’origine des trois éléments lithium, béryllium et bore à la fois légers et rares car, contrairement aux autres éléments chimiques, ils ne sont pas formés dans les étoiles.

Deux bonnes fées le mirent sur la voie de cette importante découverte. D’une part, son appartenance au laboratoire de René Bernas qui se consacrait alors à la mesure des probabilités de réactions nucléaires d’un type particulier puisqu’elles concernent des particules très énergétiques telles que celles qui constituent les rayonnements cosmiques galactiques. D’autre part, il fut très ami avec un spécialiste de ces rayonnements, du nom de Bernard Peters, qui travaillait à Copenhague, au Danemark, et qui lui fit remarquer une situation assez paradoxale : alors que le rapport entre les quantités de lithium, béryllium, bore et celles de carbone, azote, oxygène n’est que d’un millionième dans la matière ordinaire, ce même rapport atteint des valeurs de l’ordre de 25 % dans les rayonnements cosmiques galactiques. Hubert en découvrit l’explication : contrairement à tous les autres éléments chimiques dont la masse atomique est supérieure ou égale à 12, qui sont synthétisés pendant les phases calmes ou explosives des étoiles, le lithium, le béryllium et le bore sont formés par l’interaction entre le rayonnement cosmique et les noyaux d’atomes constituant le gaz interstellaire.

C’est ainsi qu’il engagea Maurice Meneguzzi et l’un de nous (Jean Audouze) pour démontrer quantitativement la pertinence de cette hypothèse. Il en résulta en 1971 un article publié dans la revue *Astronomy & Astrophysics*, un peu moins célèbre que B^2FH mais qui eut néanmoins sa petite heure de gloire ▸

Une vie tournée vers la recherche et la transmission

QUELQUES DATES

1932 Naissance à Montréal, Canada.

1960 Doctorat d’astrophysique à l’université Cornell (Ithaca, États-Unis). Entre à la Nasa.

1960-1964 Conseiller scientifique à la Nasa Institute for Space Studies, New York et enseignant à l’université Columbia (New York).

1965-1999 Arrivé en France, il est directeur de recherche au CNRS, à Paris. Au département d’astrophysique de Saclay, il travaillera sur l’origine des éléments chimiques, du Système solaire et de l’Univers.

1981–1999 Professeur associé au département de physique de l’université de Montréal.

2001–2023 Président puis président d’honneur de l’association Humanité et Biodiversité.

Mène en parallèle une activité de récitant ou commentateur dans des œuvres musicales, d’écrivain, et participe à une dizaine de films et spectacles scientifiques.

2023 Décès à Paris à l’âge de 91 ans.

SÉLECTION D’OUVRAGES

1981 : Patience dans l’Azur (Seuil).

1984 : Poussières d’étoiles (Seuil)

1986 : L’Heure de s’enivrer (Seuil).

1990 : Malicorne (Seuil).

1994 : Dernières nouvelles du cosmos (Seuil).

1996 : Intimes convictions (Éditions Parole d’Aube, PUF).

1998 : Oiseaux, merveilleux oiseaux (Seuil).

2003 : Mal de terre (Seuil).

2008 : Je n’aurai pas le temps (Seuil).

2011 : L’Univers expliqué à mes petits enfants (Seuil).

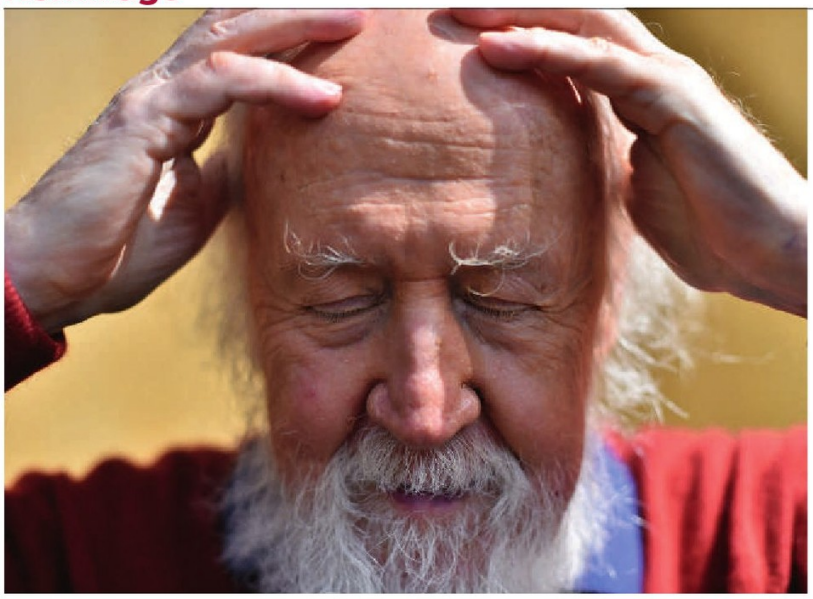
2012 : L’Avenir de la vie sur Terre (Bayard).

2013 : Là où croît le péril… croît aussi ce qui sauve (Seuil).

2016 : Les Secrets de l’Univers (Robert Laffont).

2017 : La Terre et les Hommes (Robert Laffont).

2020 : La Fureur de vivre (Seuil).



LOIC VENANCE / AFP

> “Nous avons eu la chance tous les deux d’avoir été formés à la recherche en astrophysique nucléaire par cet immense savant ”

du nom de MAR (Meneguzzi, Audouze et Reeves) puisqu’il venait heureusement compléter la grande fresque de la nucléosynthèse stellaire.

Identifier les sources de matière

L’année d’après, en 1972, il s’associa avec un collègue travaillant à Berne, en Suisse, du nom de Johannes Geiss, qui avait réussi dès 1969 à convaincre la Nasa de réaliser pour lui une expérience simple. Sur cinq des 15 voyages effectués par la fusée Apollo vers la Lune, les astronomes hissèrent des drapeaux formés de feuilles d’aluminium et les laissèrent à l’extérieur des heures durant. Chacune de ces feuilles fut récupérée, rapportée sur Terre et examinée. Du fait de son atmosphère inexistante, la Lune est l’endroit idéal pour recueillir le vent solaire et on pouvait penser que ses particules s’incrusteraient dans les feuilles d’aluminium. Quand Johannes Geiss examina celles-ci, il découvrit, entre autres choses, que le vent solaire était composé d’un atome d’hydrogène lourd pour 30 000 atomes d’hydrogène ordinaire. Johannes Geiss avait trouvé 15 fois moins d’hydrogène lourd dans le vent solaire que dans l’eau lourde terrestre. En théorie, le Soleil et la Terre sont issus de la même matière originelle, principalement de l’hydrogène.

Quelle pouvait être la cause de cette différence par un facteur 15 ? Hubert Reeves parvint à l’expliquer et les deux chercheurs déterminèrent l’abondance cosmique du deutérium. Cette détermination fut utilisée par eux deux et par tous ceux qui, comme eux, firent des calculs de ce que l’on appelle la nucléosynthèse « primordiale » qui se déroula entre une et 100 secondes après le Big Bang, bien avant la formation des étoiles. La conséquence la plus importante de ces calculs et de leurs comparaisons avec les observations est que la matière nucléaire ou atomique qui constitue tout l’Univers observable n’est que le dixième du contenu matériel total de l’Univers (la densité de matière invisible est dix fois supérieure à celle de notre matière atomique ou nucléaire) ; s’il n’en était pas ainsi, il n’y aurait pas de deutérium dans la nature.

Après Jean Audouze, Michel Cassé fut à partir de 1974 son deuxième étudiant en thèse. Ses travaux consistaient à revenir aux sources du rayonnement cosmique en relation avec les observations du satellite HEAO (High Energy Astronomical Observatory opéré par la Nasa). L’objectif était d’étudier les différences de compositions chimique et isotopique entre matière au repos dans le milieu interstellaire et celle éjectée par les supernovae, mais aussi la matière errante à haute vitesse du rayonnement cosmique. Un travail qui allait permettre d’identifier les sources de matière et de déterminer le délai entre nucléosynthèse et accélération dans le rayonnement cosmique.

Au commencement était le cosmos

La collaboration scientifique entre Hubert Reeves et Michel Cassé perdura jusqu’à la fin. C’est ainsi que peu avant sa mort, ils réfléchirent ensemble sur le fait que la masse du proton est supérieure à la somme des masses des trois quarks qui le constituent alors que le deutérium est plus léger qu’un proton plus un neutron. Ils discutaient également de l’entropie originelle de l’Univers, à son minimum, qui accrédite l’idée qu’au commencement était le cosmos et non le chaos, ceci contre toute mythologie ou théologie.

Nous avons eu la chance tous les deux d’avoir été formés à la recherche en astrophysique nucléaire par cet immense savant, c’est pourquoi nous insistons sur ses nombreuses et remarquables contributions à l’astrophysique et à la cosmologie. À côté de cette grande œuvre, et au-delà de ses remarquables et célèbres activités de vulgarisation scientifique, Hubert Reeves devint dès le début des années 2000 un ardent et actif militant pour la défense de l’environnement *(lire ci-contre)*. ■

Jean Audouze et Michel Cassé

De l'Univers à la terre de Malicorne

Dans l'ancienne ferme qu'il possédait en Bourgogne, Hubert Reeves, le jardinier amoureux des plantes, s'émerveillait de la virtuosité de la nature.

Si, la nuit, il aimait décrypter la voûte céleste, ses étoiles et ses constellations à l'attention de ses enfants et amis, dès que le jour embrasait l'horizon, Hubert Reeves s'émouvait de la présence tranquille du monde végétal et du bruissement des oiseaux. À Malicorne (Yonne) en particulier, l'ancienne ferme modèle d'un village du pays de Colette, au nord de la Bourgogne ; un havre de nature généreuse et d'innombrables échanges scientifiques et philosophiques lui ont inspiré plusieurs livres*. Il y avait planté trois cèdres du Liban, qui avaient d'abord poussé sur son bureau du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), à Saclay. Ils sont aujourd'hui gigantesques.

Aucun nuisible n'existait à ses yeux, toute plante ayant un rôle à jouer dans l'écosystème global ; mais le jardinier en lui gardait tout de même un œil sur les belles verges d'or (solidagos), capables d'envahir ses massifs. Il observait avec le prisme du cosmologue le comportement territorial des pervenches et du lierre dans les sous-bois ombragés, luttant pour occuper l'espace laissé libre par la chute d'un arbre ou un défrichage. L'abeille vrombissant entre les feuilles du grand saule de l'étang, les hirondelles volant dans le ciel et le merle sifflant la tombée du jour étaient pour lui *« des compagnons de voyage dans ce parcours qui est notre mystérieuse destinée »*.

Il était essentiel, disait-il, de *« se laisser étonner par l'extraordinaire virtuosité de la nature »*, *« d'habiter poétiquement le monde »*. Près de l'étang de Malicorne, face au grand saule pleureur qui se reflète dans l'eau, avec Camille, sa compagne et complice, ils avaient installé un banc nommé « Le Banc du temps qui passe », qui lui offrait d'intenses moments de réflexion. Une matière presque métaphysique, dont il a composé un livre. L'Univers, y écrivait-il, est *« notre maison commune, notre foyer, siège de tous les phénomènes qui nous ont amenés à exister, qui héberge notre histoire passée, présente et future »*. Il s'émerveillait de la puissance de la vie à se perpétuer dans des conditions parfois extrêmement hostiles, à survivre en près de 4 milliards d'années aux crises géologiques, climatiques, météoritiques qui auraient pu l'anéantir. *« Pour m'inclure dans ce grand mouvement cosmique,* écrit-il au détour d'une page avec l'humour qui le caractérisait, *j'ai arrosé les bégonias. »* Une empathie universelle le gagnait ainsi en observant par exemple une fourmi s'escrimant à escalader un minuscule terril de terre dans l'une des dépendances de Malicorne ou en regardant son chat dévorer avec entrain sa pâtée. *« J'ai l'impression, en vivant ma vie, de participer à quelque chose de grandiose qui me dépasse, mais dont le sens m'échappe. Je ne perds pas espoir d'en apprendre plus un jour, posthume ou non. »*

PHOTOPQR/VOIX DU NORD/MAXPPP

Hubert Reeves militait pour la préservation de la biodiversité (ici en 2014 à l'inauguration de jardins Oasis Nature, à Wattignies, dans le Nord).

Vivre en harmonie avec la nature

Hubert Reeves aimait aussi ses prochains et s'inquiétait de l'avenir de l'humanité. En 2015, il est devenu président d'honneur de l'association Humanité et biodiversité, dont le credo est : *« Placer la biodiversité au cœur de nos sociétés »*. Soit amener chacun d'entre nous à préserver un environnement indispensable à notre survie. *« Les tortues existent depuis 200 millions d'années,* écrit-il dans *La Fureur de vivre. Si on leur demandait leur recette de longévité, elles pourraient répondre : vivre en harmonie avec la nature. Sur ce point, au palmarès des espèces vivantes, nous, humains, sommes à la dernière place, […]. Si nous n'apprenons pas la leçon des tortues, nous risquons fort de périr. »* ■

Sylvie Rouat

* *Malicorne* (1986), *Le Banc du temps qui passe* (2017), *La Fureur de vivre* (2020) ; ces ouvrages ont été édités aux éditions du Seuil, sous la direction de Jean-Marc Lévy-Leblond, ami et éditeur d'Hubert Reeves.

MAGNÉTOILES, LUNES, TROUS BLANCS...

Les astres les plus intrigants

Le plus grand, le plus véloce, le plus ancien, le plus magnétique... De nombreux corps célestes défient les lois de la physique et ne cessent d'interroger les scientifiques. Notre système solaire, avec des planètes rocheuses à proximité de leur étoile et des géantes gazeuses en périphérie, n'est pas la norme. La preuve avec ce dossier qui décrit l'extraordinaire diversité des objets cosmiques.

Dossier réalisé par
Franck Daninos, Joël Ignasse,
Fabrice Nicot et Hervé Ratel

ESA/NASA/SPL/SUCRE SALÉ

INSOLITE

L'étoile qui émet des rayons laser

C'est un cas unique en son genre : Eta Carinae est la seule étoile connue à émettre des rayons laser dans l'ultraviolet. Avec une masse égale à au moins 100 fois celle de notre soleil, elle est aussi l'une des étoiles les plus massives et l'une des plus brillantes connues. Située à 7500 années-lumière de la Terre, Eta Carinae pourrait être en fin de vie. Mais quand explosera-t-elle ? Mystère. Cela pourrait être aussi bien l'année prochaine que dans 100 millions d'années. H. R.

BAPEROOKAMO, CC BY-SA 4.0

RÉVERSIBILITÉ

Les trous blancs, là où remonte le temps

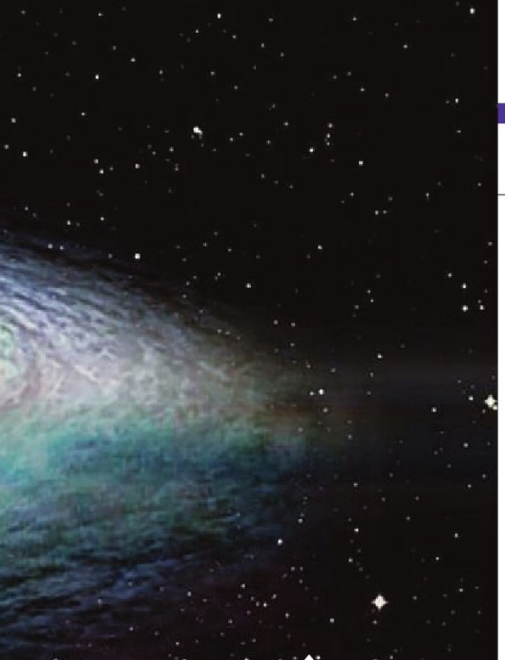
Ces astres se cacheraient parmi les trous noirs, dont ils sont issus après une inversion du cours du temps.

Dans le bestiaire cosmique, les trous blancs constituent une des pièces les plus étranges. Proches parents des trous noirs, ils en sont en quelque sorte l'image dans un miroir… qui inverserait le cours du temps ! Contempler un trou blanc reviendrait à dérouler le film d'un trou noir à l'envers. Ils ne font ainsi que recracher de la matière et de l'énergie, tandis que les trous noirs les avalent. Il est impossible de s'échapper d'un trou noir, il l'est tout autant de pénétrer dans un trou blanc.

Enfin, en théorie… Car les trous blancs ne sont qu'une hypothèse, qui remonte aux années 1960. Mais elle a été remise au goût du jour il y a quelques années par le physicien italien Carlo Rovelli, d'Aix-Marseille Université. Il vient d'ailleurs de leur consacrer un ouvrage *(lire* S. et A. *n° 920). A priori*, ils ne semblent pas plus farfelus que les trous noirs. *« Les trous blancs sont une solution des équations de la relativité générale, tout aussi valable que les trous noirs. Ces deux types de solutions vont même par paire étant donné l'invariance des équations d'Einstein par inversion du temps,* abonde Éric Gourgoulhon, du laboratoire Univers et théories à Meudon (CNRS, Observatoire de Paris), avant de nuancer sérieusement. *En revanche, d'un point de vue astrophysique, les deux solutions ont un statut bien différent. Nous n'avons pas de preuve observationnelle d'un trou blanc alors que nous en avons pour les trous noirs. Et les trous blancs macroscopiques seraient instables, contrairement aux trous noirs.* »

Aussi hypothétiques soient-ils, ils ont trouvé une utilité particulière dans le cadre de la théorie de la gravitation quantique à boucles, développée à partir des années 1980 par l'Indien Abhay Ashtekar, puis l'Américain Lee Smolin et Carlo Rovelli. Il s'agit d'une des tentatives les plus abouties pour réconcilier la théorie de la relativité générale et la physique quantique. L'une décrit la déformation de l'espace et du temps sous l'effet de la masse et de l'énergie à l'échelle de l'Univers. L'autre dépeint les interactions entre les particules élémentaires peuplant l'infiniment petit. Mais la relativité générale ne dit rien des particules élémentaires, comme la physique quantique ne sait rien des étoiles et des galaxies.

Pourtant, dans un trou noir comme dans un trou blanc — qui constitue son stade ultime d'évolution —, les deux théories se trouvent mêlées. Le seul mécanisme connu pour expliquer la formation de ce type d'astre est l'effondrement gravitationnel d'une étoile d'au moins trois



De la matière jaillirait en continu d'un trou blanc, contrairement à un trou noir qui l'avale (vue d'artiste).

fois la masse du Soleil. La concentration de matière et d'énergie devient telle qu'il finit par se former une singularité, où la densité d'énergie tend vers l'infini tandis que l'espace s'étire comme un entonnoir sans fin. Mais ces infinis n'ont pas de traduction physique. La gravitation quantique à boucles supprime cet écueil en postulant que l'espace ne peut justement pas être divisé à l'infini. Il serait impossible de descendre sous 10^{-35} mètre. Rien ne pouvant être inférieur à ce quantum d'espace, la singularité disparaît. Lorsque l'étoile en effondrement sur elle-même atteint ces échelles, un changement fondamental se produit. Selon Carlo Rovelli, le cours du temps s'inverse et l'étoile « rebondit ». C'est ainsi que les trous noirs sont amenés à devenir des trous blancs…

Le chercheur insiste ainsi sur les similitudes entre les deux astres. Un trou blanc, par exemple, exercerait une attraction gravitationnelle comme un trou noir, et non une répulsion. En revanche, un objet chutant vers lui tomberait infiniment lentement sur le trou blanc, jusqu'à rencontrer la matière qui en sort. Et il n'y entrerait jamais. Il reste désormais à caractériser suffisamment ces trous blancs pour tenter de les débusquer parmi la multitude des trous noirs. ■ **F. N.**

PHÉNOMÈNE

Tabby, un phare dans l'espace

Un clignotement curieux et irrégulier. Voici ce que l'on observe quand on pointe les télescopes sur l'étoile de Tabby, située à 1470 années-lumière et ainsi nommée en l'honneur de l'astrophysicienne américaine Tabetha Boyajian, qui l'a décrite en 2015. Pour l'expliquer, des astronomes ont proposé en 2019 qu'elle aurait arraché des blocs de l'exolune gravitant autour d'elle, les débris épars contribuant ainsi à ces variations de luminosité. En 2021, une autre explication était proposée : l'étoile de Tabby aurait un compagnon stellaire plus petit, KIC 8462852 B, une naine rouge qui pourrait jouer un rôle dans les oscillations lumineuses observées depuis la Terre. **H. R.**

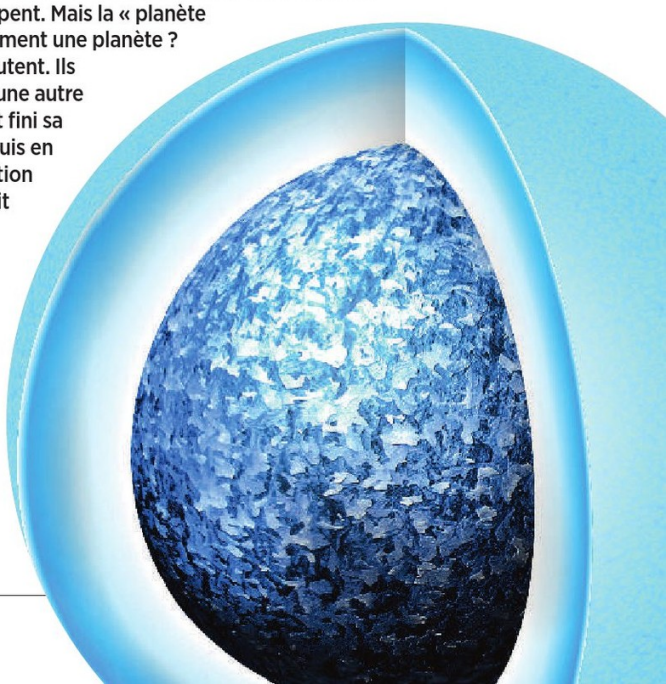
L'étoile connaît des variations de luminosité.

NASA/JPL-CALTECH

VESTIGE

L'étoile devenue « planète diamant »

Un gigantesque diamant de 6000 kilomètres de diamètre, dont la masse équivaudrait à 300 fois celle de la Terre pour un diamètre cinq fois supérieur ! Voici à quoi ressemblerait PSR J1719-1438 b, une « planète diamant » unique en son genre. Elle orbite en un peu plus de deux heures autour de son étoile, à 60 000 kilomètres. Celle-ci serait un vestige d'étoile massive ayant explosé en supernova, un pulsar (ou étoile à neutrons) situé à 4000 années-lumière du Soleil, dans la constellation du Serpent. Mais la « planète diamant » est-elle vraiment une planète ? Les astronomes en doutent. Ils penchent plutôt pour une autre étoile morte, qui aurait fini sa vie en géante rouge, puis en naine blanche. L'accrétion avec son pulsar n'aurait laissé qu'un cœur de naine blanche très dense, constitué de noyaux de carbone et d'hydrogène sous forme cristallisée. H. R.



UNIVERSITY OF WARWICK/MARK GARLICK

PSR J1719-1438 b pourrait être une naine blanche dont le cœur est cristallisé (vue d'artiste).

OBSERVATION

L'astre qui ne voulait pas mourir

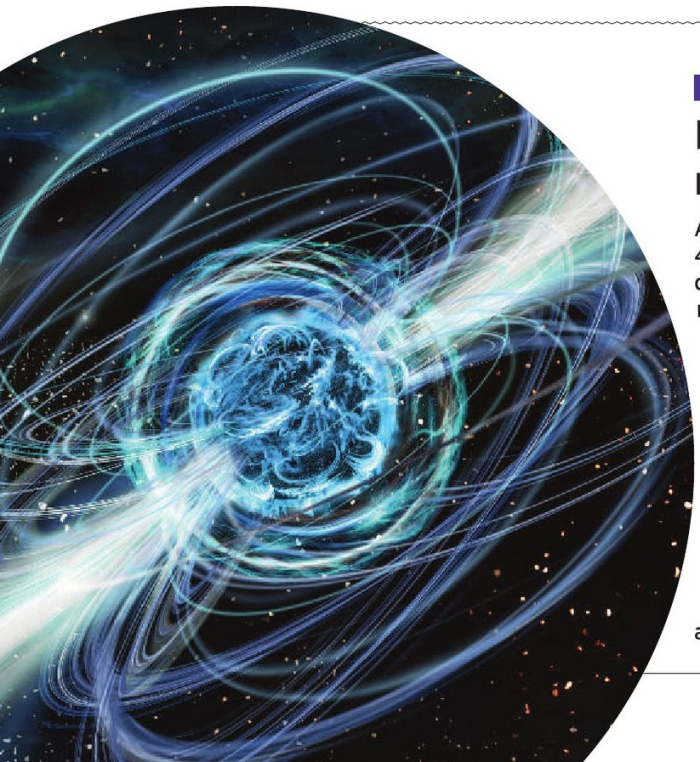
En fin de vie, l'étoile iPTF14hls a continué à briller pendant 600 jours après son explosion en supernova.

Les plus grosses étoiles quittent le théâtre cosmique sous forme de formidables explosions nommées supernovae à effondrement de cœur. En quelques millisecondes, leurs enveloppes externes sont projetées dans l'Univers qu'elles ensemencent et elles se transforment alors, en un seul coup et de façon irréversible, en étoiles à neutrons ou en trous noirs, selon leur masse. Le déchaînement d'énergie qui se produit rend le phénomène extrêmement lumineux pendant une centaine de jours environ. C'est ce que pensaient contempler les astronomes de l'observatoire du mont Palomar en Californie (États-Unis), quand ils ont repéré iPTF14hls.

Mais l'étoile à l'origine de cette supernova a joué un tout autre spectacle : elle a continué de briller pendant plus de 600 jours ! Et, au lieu de décroître, sa courbe de luminosité a présenté cinq pics laissant penser que de nouvelles explosions se sont produites, selon le compte rendu publié en 2017 dans *Nature*. *« Après cette date, nous avons continué à observer cette supernova et, curieusement, environ 400 jours plus tard, sa luminosité a soudainement chuté très rapidement. Cela n'aide pas à mieux comprendre le phénomène ! »*, souligne Iair Arcavi, premier auteur de l'étude, aujourd'hui à l'École de physique et d'astronomie de l'université de Tel-Aviv (Israël).

Encore plus intrigant : en fouillant dans les archives des relevés astronomiques, les astronomes ont remarqué qu'iPTF14hls avait fait son entrée en scène… en 1954 ! À cette date, ils ont en effet retrouvé un signal lumineux transitoire dans la même région du ciel, suggérant qu'une première explosion avait déjà eu lieu. Plusieurs explications ont été proposées pour comprendre l'étrange comportement de cet astre qui ne semble pas vouloir mourir. Il pourrait s'agir d'une étoile très massive, de 90 à 130 masses solaires, dont le cœur est si chaud qu'elle fabrique de l'antimatière, ce qui la rend extrêmement instable. Ou encore d'une étoile qui éjecte sa masse sous forme d'une série d'impulsions, voire d'un astre qui explose et donne naissance à une magnétoile perturbant son environnement avec des jets de rayonnements très énergétiques.

Mais le plus probable est qu'il s'agisse… de tout autre chose ! Comme le regrette Iair Arcavi : *« Nous ne sommes pas beaucoup plus proches de la compréhension d'iPTF14hls aujourd'hui qu'en 2017. Il n'y a eu aucune percée en matière de modélisation à ce sujet. Nous nous inter-*

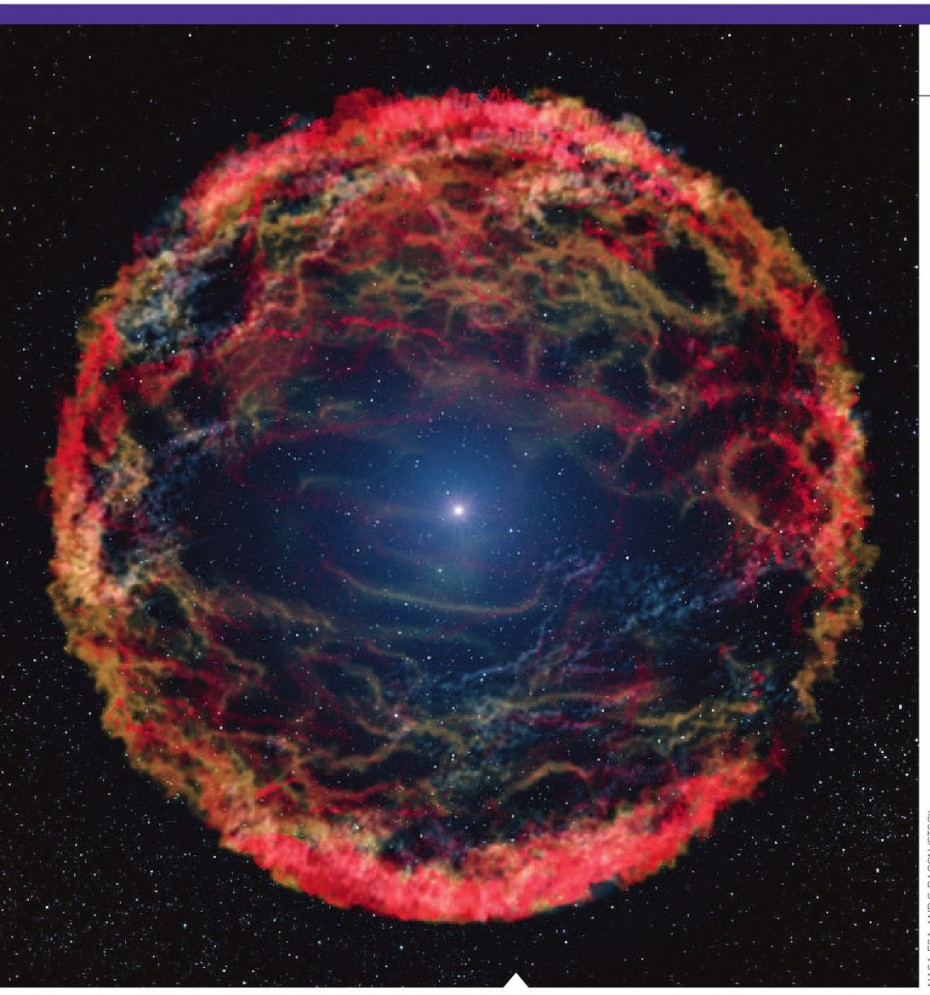


GETTY IMAGES

DÉCOUVERTE

L'objet céleste le plus magnétique de l'Univers

Avec un champ magnétique estimé à 43 000 gauss, l'étoile HD 45166 est la plus magnétique jamais observée : des dizaines de milliers de fois plus que le Soleil ! Ce champ record a été mesuré seulement en août dernier, grâce au télescope Canada-France-Hawaii (CFHT), dissipant au passage un mystère presque centenaire. L'astre était en effet connu pour son comportement ne cadrant pas du tout avec les modèles classiques d'évolution d'étoiles. Cela s'expliquerait par l'intense champ magnétique qui l'entoure et perturbe son rayonnement. Et ce n'est pas fini. Cette étoile en fin de vie devrait s'effondrer sur elle-même pour former une magnétoile *(vue d'artiste ci-contre)*, une étoile à neutrons dotée d'un champ magnétique atteignant des millions de milliards de gauss. De quoi donner le tournis lorsque l'on songe qu'un petit aimant de type magnet collé sur son frigo atteint environ 1000 gauss. F. N.



NASA, ESA, AND G. BACON (STSCI)

iPTF14hls aurait explosé au moins cinq fois depuis soixante ans (vue d'artiste d'une étoile en cours d'explosion).

rogeons donc toujours et espérons découvrir bientôt quelque chose qui pourrait aider à résoudre ces énigmes. »

Ce quelque chose pourrait être une étoile reproduisant le même scénario qu'iPTF14hls. À ce jour, rien de strictement identique n'a encore été repéré mais la supernova SN 2020faa, observée en 2020 par la caméra du Zwicky Transient Facility toujours à l'observatoire du mont Palomar, a présenté un profil de luminosité partiellement similaire. *« SN 2020faa ressemblait au départ beaucoup aux éclats d'iPTF14hls. Plus tard, elle s'est révélée moins extrême, mais il pourrait quand même y avoir un lien »*, estime l'astrophysicien. En effet, après l'explosion initiale, cette supernova a également connu un nouveau pic de luminosité et sa couleur ainsi que son évolution ont été similaires à celle d'iPTF14hls, pendant les six premiers mois au moins. Elle a ensuite décliné plus rapidement, mais les astronomes ont continué à l'observer et tous les résultats ne sont pas encore dévoilés. L'analyse de cet événement permet de préciser les paramètres de ce type d'explosion mais, hélas, pas encore de trancher sur sa nature exacte. ■ **J. I.**

RECORD

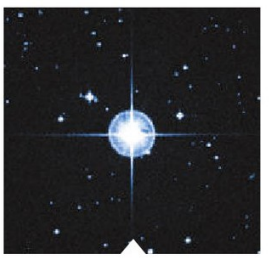
L'incroyable vitesse d'une étoile en fuite

2285 km en une seconde, soit quatre fois Paris-Lyon : voici ce que parcourt J0927-6335, l'étoile la plus rapide de la galaxie. Elle est dix fois plus rapide que le Soleil dans son déplacement autour du centre de la galaxie. Sa vitesse est due sans doute à l'explosion en supernova de l'étoile qui l'accompagnait. Seulement quatre astres ont été chronométrés à plus de 1000 km/s dans la Voie lactée. F. N.

LONGÉVITÉ

Une Mathusalem habite la Voie lactée

À moins de 200 années-lumière de la Terre, dans la constellation de la Balance, se déplace à 1,3 million de km/h un astre tout aussi véloce que paradoxal. Les premiers calculs réalisés en 2013 grâce au télescope spatial Hubble laissaient penser aux astronomes que HD 140283 pouvait être… plus ancien que l'Univers observable, soit 16 milliards d'années, contre 13,8 milliards d'années ! Mais en tenant compte des marges d'erreurs des calculs et du fait que cette étoile contient plus d'oxygène que mesuré en première instance, et donc consomme différemment son carburant nucléaire, les astronomes ont revu à la baisse leurs estimations. Actuellement cette étoile, baptisée Mathusalem, principalement constituée d'hydrogène et d'hélium, daterait d'au moins 12,2 milliards d'années. Ce qui en fait néanmoins le plus vieil astre connu, formé peu de temps après le Big Bang. **H. R.**



DSS, STSCI/AURA, PALOMAR/CALTECH, ANDUKSTU/AAO

HD 140283 serait âgée d'au moins 12,2 milliards d'années.

Le satellite Japet, dont cette vue est l'assemblage de quatre images capturées par la sonde Cassini en 2004.

NASA/JPL/SPACE SCIENCE INSTITUTE

SINGULARITÉ

La lune mi-blanche, mi-noire

La nature bicolore de Japet, un satellite de Saturne, est sans équivalent dans le Système solaire.

On recense actuellement 290 lunes dans le Système solaire, dont un peu plus de la moitié autour de Saturne, grâce aux 62 nouveaux satellites découverts en mai dernier aux abords de la planète aux anneaux. Tous ces astres affichent une remarquable diversité : par leur orbite, leur composition, leur histoire géologique ou encore leur taille, variant de quelques centaines de mètres à plus de 5000 kilomètres de diamètre. Or dans ce bestiaire, le troisième plus gros satellite de Saturne — dénommé Japet — est l'un des plus intrigants. « *Il cumule les bizarreries et propriétés singulières* », indique Alice Le Gall, du Laboratoire atmosphères, observations spatiales de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines. Sa nature bicolore, en particulier, est sans équivalent dans le Système solaire, l'un de ses hémisphères apparaissant aussi noir que l'ébène tandis que l'autre, blanc, est 20 fois plus brillant. Mais Japet possède aussi une gigantesque chaîne de montagnes ceinturant les trois quarts de son équateur, sur 70 km de large et jusqu'à 20 km de haut (deux fois plus que l'Everest) — « *structure elle aussi exceptionnelle dont l'origine reste à ce jour indéterminée* », souligne la planétologue.

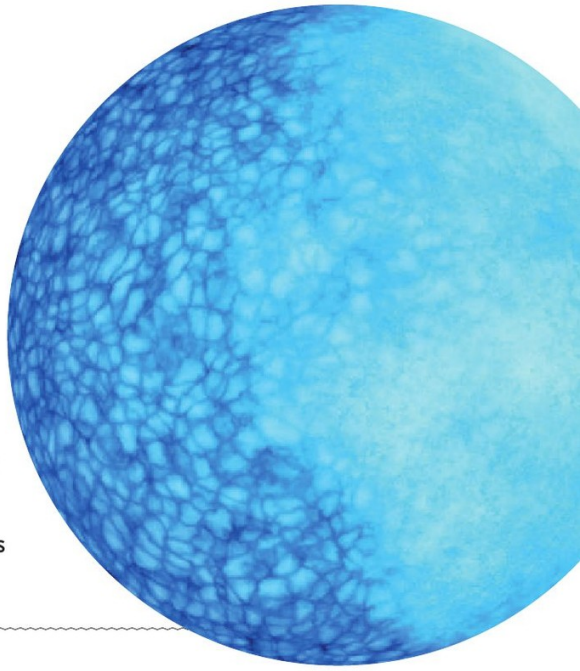
Une chaîne de montagne née d'un ancien système d'anneaux

Identifiée dès la fin du XVII^e^ siècle, la dichotomie de couleur de Japet n'a pu être expliquée que 350 ans plus tard, au tournant des années 2010. Pour comprendre, il faut préciser que ce satellite possède comme notre Lune une rotation « synchrone » : il présente toujours la même face à Saturne et c'est toujours la même face qui est orientée dans le sens avant du mouvement orbital. Or, entre 2009 et 2015, grâce aux télescopes spatiaux Spitzer et Wise, des astronomes ont découvert qu'il traversait un anneau de poussières très vaste et diffus — appelé anneau de Phœbé — tournant en sens inverse autour de Saturne. Les poussières s'accumulent donc préférentiellement sur la face avant de Japet, « *de la même manière que la pluie tombe davantage sur le pare-brise d'une voiture plutôt qu'à l'arrière* », explique Alice Le Gall. Couvert de poussières noires, cet hémisphère absorbe alors une plus grande quantité de lumière solaire, ce qui élève la température et sublime la glace d'eau sous-jacente. « *Transformée en vapeur, l'eau se recondense ensuite sur la face arrière où il fait plus froid* », détaille la chercheuse. D'où ces deux « visages », l'un sombre, l'autre brillant. Pour ce qui concerne la crête équatoriale, les suppositions ne manquent pas :

DICHOTOMIE

Le double visage de la naine blanche Janus

Surprise en flagrant délit de transition ! L'étoile Janus, à 1300 années-lumière, tourne sur elle-même toutes les quinze minutes et sa luminosité varie d'un maximum lorsque sa face recouverte d'hydrogène est pointée vers la Terre, à un minimum lorsqu'elle présente l'hémisphère opposé, recouvert d'hélium. Du jamais-vu pour une naine blanche. Certaines sont cependant connues pour, en se refroidissant, passer d'une phase hydrogène à une phase hélium quand ce gaz remonte en surface à cause de phénomènes de convection au centre de l'étoile. Mais cette conversion se fait normalement en quelques secondes et cette dichotomie est inédite. Des champs magnétiques asymétriques pourraient jouer un rôle en empêchant l'hélium de se mélanger à l'hydrogène du côté de l'hémisphère où ils sont les plus puissants, ou en influant sur la pression et la densité de l'atmosphère, autorisant le maintien d'un océan d'hydrogène. D'autres observations sont nécessaires pour mieux comprendre cette étoile. J. I.



K. MILLER, CALTECH/IPAC

phénomènes de convection, remontée de la croûte à la suite d'un ralentissement soudain de Japet, qui dans le passé devait pivoter sur elle-même à une vitesse bien plus rapide qu'actuellement (79 jours)… En 2010, une équipe américaine a même soutenu que ce bourrelet pourrait provenir d'un ancien corps gravitant autour de Japet — une lune de lune ! — qui se serait disloqué avant de s'écraser dessus. L'hypothèse d'une cause exogène est aujourd'hui privilégiée. Elle ne repose pas, néanmoins, sur l'existence d'un subsatellite mais d'un ancien système d'anneaux. En 2021, des astronomes de l'université d'État de Caroline du Nord (États-Unis) ont fourni de nouveaux éléments appuyant cette théorie. En se fondant sur des analyses morphologiques, ils ont montré comment la matière annulaire aurait pu se déposer progressivement au niveau de l'équateur jusqu'à former une chaîne de montagnes très abruptes avec des pentes à 40°. « *Rien n'est scellé* », insiste toutefois Alice Le Gall. Car aucun modèle n'est encore parvenu à reproduire l'ensemble des caractéristiques de la crête, comme des altitudes variant du simple ou double d'un hémisphère à un autre ou le fait qu'elle ne s'étende que sur 75 % de l'équateur. ■ **F. D.**

CANNIBALISME

Une étoile de Thorne-Zytkow abrite une autre étoile en son sein

Du « cannibalisme » stellaire, voilà ce qu'ont imaginé dans les années 1970 le physicien américain Kip Thorne (prix Nobel 2017) et l'astrophysicienne polonaise Anna Zytkow. Il pourrait résulter de la fusion entre une étoile à neutrons de quelques kilomètres de diamètre et une géante rouge de plusieurs millions de kilomètres. Ce serait possible car les étoiles vivent très souvent « en couple ». Si l'une d'elles explose en supernova et se transforme en étoile à neutrons, elle pourrait dans certains cas s'installer au cœur de sa compagne encore active. Ce cannibalisme aurait pour effet de la faire briller très puissamment, à la manière d'une supergéante rouge. Des objets encore hypothétiques mais peut-être plus pour longtemps. L'étoile HV 2112, découverte en 2014, constitue la candidate la plus sérieuse pour incarner une « TZ ». Emily Levesque, de l'université de Washington (États-Unis), étudie l'étoile depuis 2014 et envisage d'utiliser les ondes gravitationnelles grâce aux détecteurs Advanced Virgo pour prouver qu'il ne s'agit pas d'une supergéante classique. À suivre. **F. N.**

ASTRONOMY MAGAZINE

L'astre hybride serait formé d'une supergéante rouge dont le cœur est une étoile à neutrons (vue d'artiste).

DÉCOUVERTE

Étoiles noires : et pourtant elles brillent !

Des étoiles composées de la mystérieuse matière noire pourraient avoir éclairé les débuts de l'Univers.

TOBIAS ROETSCH

Constituées en partie de matière noire, ces étoiles auraient illuminé les débuts de l'Univers, 200 millions d'années après le Big Bang (vue d'artiste).

Et si la fameuse matière noire que l'on recherche partout dans l'Univers était là, presque sous nos yeux, au cœur d'étoiles éblouissantes photographiées par le télescope spatial James-Webb ? Voilà qui résoudrait l'un des plus épais mystères de la cosmologie. La matière noire représente 27 % de la matière totale contenue dans l'Univers, mais on ignore tout de sa nature car elle n'interagit avec rien. On ne détecte sa présence que parce qu'elle agit sur la matière classique au travers de l'interaction gravitationnelle. Mais en juillet dernier, une équipe de chercheurs de l'université d'Austin, au Texas (États-Unis), fait une hypothèse étonnante. Dans un article publié dans le journal de l'Académie des sciences américaine, les scientifiques désignent trois objets « Jades » rougeâtres observés par le JWST fin 2022 au tout début de l'Univers comme des candidats au titre de premières étoiles de matière noire. Le concept d'étoile noire remonte à 2008 : les Américains Douglas Spolyar, Katherine Freese (également cosignataire de l'article de juillet 2023) et Paolo Gondolo proposent alors un modèle d'étoiles composées en partie de matière noire. Elles atteindraient plusieurs millions de fois la masse de notre soleil, et brilleraient jusqu'à 10 milliards de fois plus ! Elles auraient illuminé l'enfance de l'Univers, avant même les étoiles ordinaires, d'où l'excitation autour des observations du James-Webb. Car ces fameux objets

REFROIDISSEMENT

Naines noires, celles qu'on ne verra jamais

Trop jeune. Malgré ses 13,8 milliards d'années, l'Univers n'a pas eu le temps de former une seule naine noire. Un reste stellaire qui est l'étape ultime (et théorique) de l'évolution d'une étoile peu massive comme le Soleil. Avant, elle sera passée par le stade de géante rouge puis de naine blanche : un objet chaud d'une température initiale pouvant atteindre 100 000 kelvins et dont la faible surface fait qu'il va mettre très longtemps à se refroidir. Probablement des dizaines de millions de milliards d'années ! Voire beaucoup plus : l'incertitude domine tant son évolution

SPL/SUCRE SALÉ

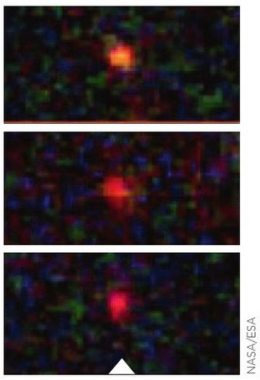
L'étoile refroidie met plus de temps à se former que l'âge de l'Univers (vue d'artiste).

touche à des questions fondamentales — tels la durée de vie du proton ou les scénarios de fin de l'Univers —, encore irrésolues. Une fois froide, il ne restera plus qu'une sphère noire quasi indétectable hormis par son influence gravitationnelle. Un tour de passe-passe quantique pourrait toutefois enclencher une nouvelle fusion engendrant une supernova noire, mais cela ne se produira pas avant 10^{1100} années… **J. I.**

RECORD

La plus grande de toutes les étoiles

Avec un rayon estimé à 2150 fois celui du Soleil, Stephenson 2-18 est la plus grande étoile connue. Si elle était placée au centre du Système solaire, elle s'étendrait au-delà de l'orbite de Saturne ! Elle se situe à 20 000 années-lumière de la Terre dans la constellation de l'Écu de Sobieski. J. I.



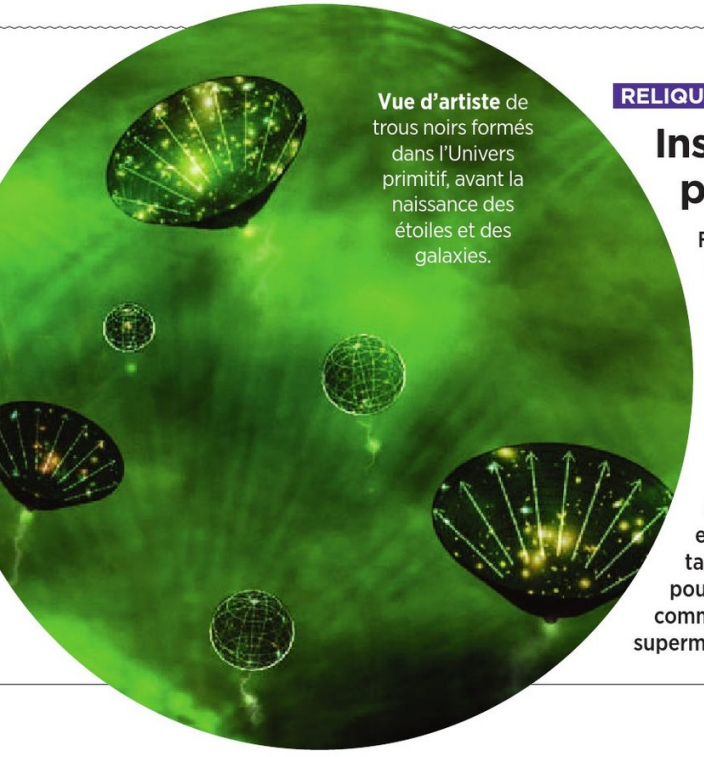
NASA/ESA

Ces trois objets « Jades » repérés par le James-Webb pourraient être les premières étoiles noires.

Jades sont vus seulement quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Pour l'heure, ils sont catalogués comme des galaxies précoces. Mais pour Katherine Freese, *« cela peut être des galaxies contenant des millions d'étoiles […] ou bien des étoiles noires, car une seule étoile noire émet assez de lumière pour rivaliser avec une galaxie tout entière »*.

Alors, galaxies précoces ou étoiles noires? Selon le modèle de formation des étoiles noires, les protogalaxies étaient peuplées d'amas très denses de matière noire, ainsi que d'hydrogène et d'hélium gazeux. Le gaz se refroidissant, il s'est effondré sur lui-même, entraînant la matière noire avec lui. Les particules de matière noire se sont trouvées comprimées jusqu'à s'annihiler entre elles, dégageant de la chaleur. Ce chauffage s'est opposé à l'effondrement gravitationnel du gaz. Le noyau n'a pas pu atteindre la densité nécessaire pour commencer la fusion nucléaire. Au lieu de cela, l'astre a continué d'amasser du gaz et de la matière noire, devenant beaucoup plus gros et brillant. Mais certaines étapes de ce scénario sont contestées. Notamment, des simulations en 3D réalisées en 2014 par l'équipe d'Athena Stacy, de l'université de Californie (États-Unis), ont montré que les réactions d'annihilation n'empêcheraient pas l'effondrement du gaz… Par ailleurs, s'il est vrai que la présence de galaxies si tôt dans l'Univers surprend, les modèles parviennent tout de même à expliquer leur existence. L'option « étoile de matière noire » n'est donc pas indispensable pour justifier ces lumières si précocement dans l'Univers.

Les partisans des étoiles noires ne se démoralisent pas pour autant. Ils attendent avec impatience de nouvelles mesures de la lumière émise par ces objets Jades, estimant qu'elle sera différente selon qu'elle provienne d'une galaxie, ou d'une étoile de matière noire. ■ **F. N.**



Vue d'artiste de trous noirs formés dans l'Univers primitif, avant la naissance des étoiles et des galaxies.

KAVLI IPMU

RELIQUES

Insaisissables trous noirs primordiaux

Formés dans les premières fractions de seconde qui suivent le Big Bang, les trous noirs primordiaux seraient issus de fluctuations quantiques du plasma. Leur masse pouvait varier de quelques grammes à plusieurs centaines de milliers de masses solaires ! Les plus légers d'entre eux se sont évaporés depuis, et seuls ceux dont la masse dépassait 10^{11} kg pourraient être observés aujourd'hui. Problème : ils ne seraient pas plus gros qu'un atome… Il est aussi possible que les cadavres des premiers soient toujours présents sous la forme de reliques de Planck, des cicatrices de l'espace-temps, derniers témoins de leur existence, dont la masse n'excéderait pas 10^{-8} kg pour une taille infinitésimale. Leur existence, si elle était prouvée, pourrait permettre de résoudre des problèmes fondamentaux comme la matière noire ou l'existence des trous noirs supermassifs dont ils seraient les graines. J. I.

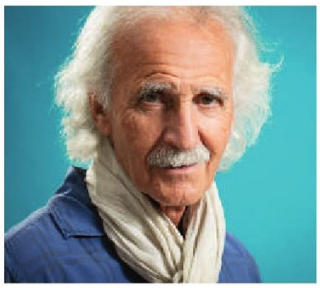
JEAN-PIERRE BIBRING
CHERCHEUR À L'INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE, À ORSAY (ESSONNE)

« Tous les objets du cosmos, y compris la Terre, sont uniques »

L'astrophysicien français revient sur l'extraordinaire diversité des corps célestes qui peuplent l'Univers, dont chacun est le fruit de contingences multiples.

Plus on scrute l'Univers, plus on découvre des objets d'une stupéfiante diversité. Les scientifiques s'attendaient-ils, par le passé, à une telle richesse ?

Pour l'essentiel, non. À partir de la Renaissance, les grandes révolutions scientifiques — surtout en physique — ont pu démontrer que les lois qui régissent le comportement de la matière étaient fondamentalement déterministes et universelles, opérant de la même façon à toutes les échelles d'espace et de temps, comme la gravité ou l'électromagnétisme. *« Les mêmes causes produisant toujours les mêmes effets »*, on s'attendait ainsi à ce que le générique l'emporte sur le particulier. Et à pouvoir extrapoler ce que l'on connaissait de notre monde, la Terre, à d'autres corps peuplant l'Univers. Mais il n'y a jamais de conditions d'origine strictement identiques ! Et la réalité des objets cosmiques, tels qu'ils se révèlent aujourd'hui, montre à quel point l'extrapolation est trompeuse.



ARNAUD MEYER/LEEXTRA/OPALE

BIO EXPRESS

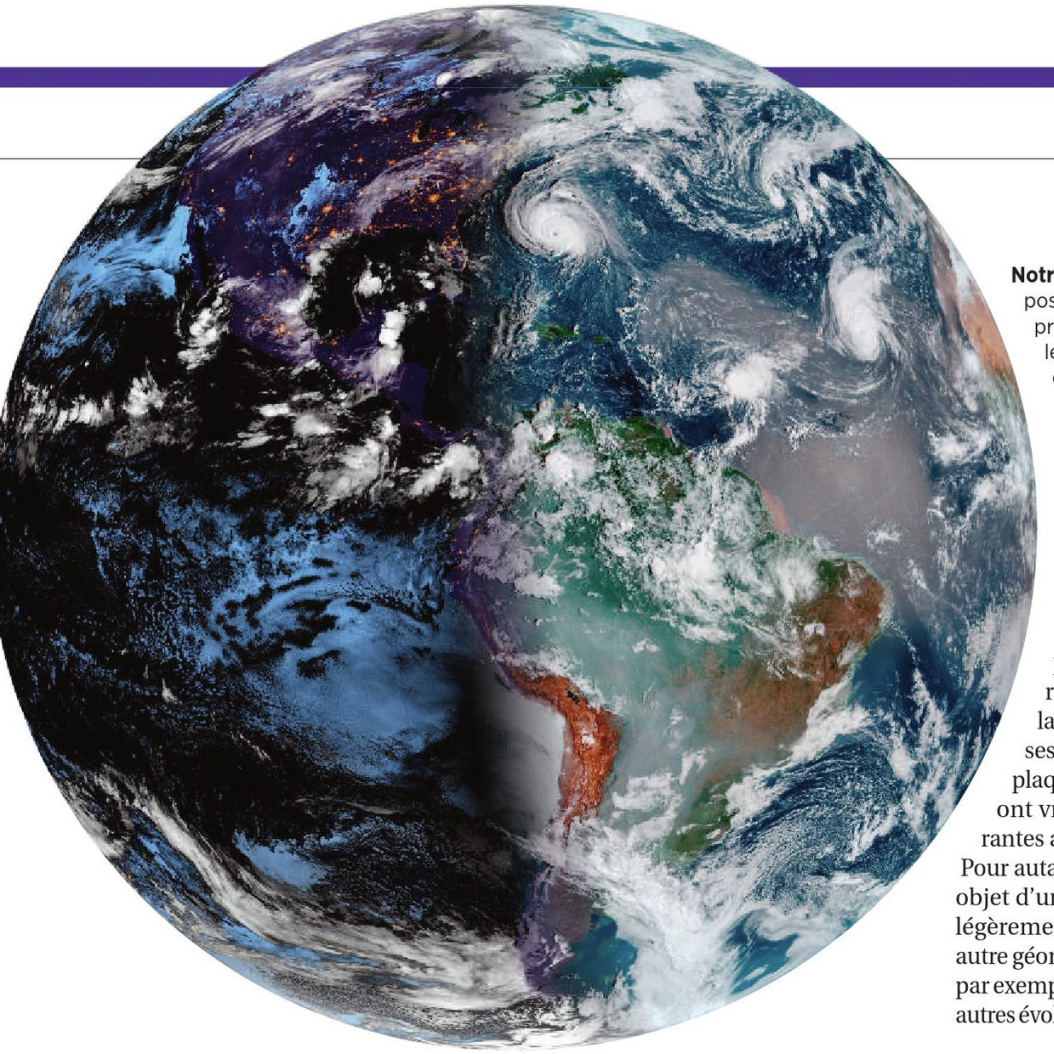
- **1948 :** Naissance à Paris.
- **1978 :** Doctorat en astrophysique à l'université Paris-Sud.
- **1984 :** Chercheur à l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay (Essonne).
- **2003 :** Responsable de l'instrument Omega de la sonde Mars Express.
- **2007 :** Prix des sciences de l'Univers de l'Académie des sciences.
- **2015 :** Membre de l'Académie de l'air et de l'espace.
- **2022 :** Publication de *Seul dans l'Univers : de la diversité des mondes à l'unicité de la vie* (Odile Jacob).

Par quelles observations ?

L'exploration spatiale, à partir des années 1960, a permis de décrire de plus en plus finement les planètes, leurs lunes, ainsi que certains astéroïdes et comètes : ce qui en ressort est l'extraordinaire diversité de leurs propriétés. En parallèle, depuis les premières identifications d'exoplanètes dès le milieu des années 1990, l'astronomie a étendu cette diversité aux autres systèmes planétaires. La structuration qu'on pensait intangible, avec de petites planètes rocheuses comme la Terre et Mars à proximité de leur étoile et des géantes gazeuses en périphérie telles Jupiter ou Saturne, n'est finalement pas la norme. Ce n'est pas que la Terre et le Système solaire soient atypiques : dès qu'on peut pousser leur caractérisation, tous les objets du cosmos apparaissent différents. Le paradigme dominant n'est donc plus celui de la pluralité des mondes mais de leur diversité.

De quels processus cette diversité résulte-t-elle ?

Alors même que cette diversité s'affirme comme la norme, on commence tout juste à en comprendre les raisons en identifiant les processus responsables. L'un d'eux, exemplaire, est le phénomène de migration planétaire par lequel les planètes n'ont pas toujours été positionnées à l'endroit où on les observe aujourd'hui. Il s'agirait d'un processus extrêmement générique, qui pourrait avoir opéré dans notre propre système solaire et fortement influencé sa structure, comme l'a proposé le groupe d'Alessandro Morbidelli à l'observatoire de la Côte d'Azur. Selon ce modèle, Jupiter puis Saturne ont été les premiers astres formés, à grandes distances du Soleil naissant. En interagissant avec le disque protosolaire de gaz et de poussières, ces deux planètes ont entamé une migration en direction du Soleil, balayant le disque à mesure de leur progression. Mais la structure particulière du disque protosolaire, ainsi que la masse relative de ces deux objets, ont conféré à cette migration un mouvement très singulier : Saturne, en rejoignant Jupiter dans son déplacement vers le Soleil, a en effet inversé la direction de cette migration. Toutes deux seraient reparties vers l'extérieur, confinant suffisamment de matière dans les régions internes pour



Notre planète possède des spécificités propres, parmi lesquelles le vivant ou la couverture nuageuse. ◄

NOAA/SPL/SUCRE SALÉ

que de petites planètes rocheuses, dont la Terre, s'y forment. Un disque initial de propriétés quelque peu différentes, en composition, température, structure et dynamique aurait conduit à un tout autre cortège d'objets. La migration planétaire est certes générique, déterministe. Mais c'est par la forme qu'elle prend, résultat de contingences multiples, que naît l'extraordinaire diversité des objets de l'Univers.

Qu'est-ce qui a concouru, en particulier, à l'unicité de la Terre ?
Les propriétés de la Terre résultent d'une évolution faite d'innombrables bifurcations, d'une suite d'événements et d'épisodes critiques, chacun de forme spécifique, liée à un contexte singulier rendant infime la probabilité qu'ils se présentent ailleurs. L'impact géant que la Terre aurait connu peu après sa formation il y a 4,6 milliards d'années l'illustre fort bien. Il a été proposé comme origine de la Lune : elle se serait accrétée dans le disque engendré par l'impact. Or la Lune, par sa masse relative à celle de la Terre, a exercé un effet majeur sur notre planète : la stabilisation de son obliquité, engendrant celle de son climat sur des échelles de temps géologiques, comme l'a montré Jacques Laskar, de l'Observatoire de Paris. Mais l'impact a eu d'autres conséquences déterminantes sur l'évolution de la Terre, qui n'ont pas encore été toutes explorées : sur sa structure interne, la formation et la pérennité de ses océans ou sa tectonique des plaques. Des collisions de ce type ont vraisemblablement été courantes au début du Système solaire. Pour autant, un impact géant avec un objet d'une taille ou de composition légèrement différentes ou selon une autre géométrie — frontale ou rasante, par exemple — aurait conduit à de tout autres évolutions. À une tout autre Terre !

> « Les propriétés de la Terre résultent d'une évolution faite d'innombrables bifurcations rendant infime la probabilité qu'elles se présentent ailleurs »

La vie pourrait-elle être, elle aussi, une propriété spécifique de la Terre ?
C'est ce qui semble, au même titre que d'autres propriétés terrestres comme les couvertures océanique, nuageuse et atmosphérique, ou la tectonique de plaques : toutes constituent la forme singulière de processus génériques. De même, le vivant serait la forme extraordinairement spécifique d'un phénomène très général : la complexification de la chimie organique cosmique. Ses propriétés résulteraient de l'évolution intimement liée à celle, très singulière, du disque protosolaire et de la Terre. Les « propriétés du vivant » ne seraient donc pas génériques mais par essence contingentes, façonnées par des séquences réactionnelles orientées à chaque étape par un contexte particulier. Et par là singulières, au sein des milliards de milliards de planètes de notre galaxie. Le vivant serait « unique » comme l'est la Terre à laquelle il s'est continûment adapté. ■ **Propos recueillis par F. D.**

La course aux armes hypersoniques s'accélère

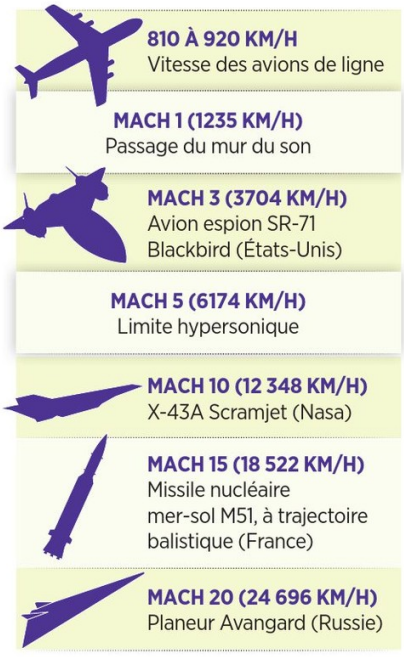
Des missiles et des planeurs atteignant des vitesses supérieures à 6000 km/h avec des trajectoires aléatoires parviennent à déjouer les systèmes de défense les plus sophistiqués. Un atout pour mener des combats aériens, qui nécessite de maîtriser des propulsions complexes.

C'était une étape attendue : le 26 juin dernier, la France a réalisé le premier vol d'essai de son prototype de planeur hypersonique VMaX depuis le site landais de la Direction générale de l'armement à Biscarrosse. Avec cette nouvelle arme développée par ArianeGroup, notre pays rejoint le cercle étroit des armées qui y travaillent. Cette arme a été utilisée de manière opérationnelle en mars 2022, lorsque la Russie a lancé ses missiles Kinjal pour détruire un entrepôt d'armement ukrainien. Une arme hypersonique se définit par son extrême vitesse — plus de 6000 km/h, soit cinq fois la vitesse du son (Mach 5*) —, sa capacité à manœuvrer à cette vitesse et par une trajectoire qui se fait en majeure partie dans l'atmosphère, à la différence des missiles balistiques.

Ces caractéristiques rendent leur trajectoire imprévisible et leur interception difficile. Elles s'avèrent également d'une grande précision : *« Le deuxième essai du planeur C-HJB américain, le 19 mars 2020, aurait permis de frapper à 15 cm du point visé au terme d'un vol de 4000 km de portée »*, indiquait en 2021 Joseph Henrotin, un politologue belge, dans une note de l'Institut français des relations internationales (Ifri). Les armes hypersoniques font aujourd'hui l'objet d'une course à l'armement entre grandes puissances militaires. En avril 2022, un mois après le coup d'éclat militaire russe, les États-Unis ont annoncé le succès du deuxième test de leur missile hypersonique Hawc, désormais opérationnel. La Chine, le Japon, l'Inde et potentiellement les deux Corées développent également ces armes hypervéloces, qui se déclinent selon deux modes : les missiles de croisière et les planeurs *(voir l'infographie p. 48)*.

Qu'est-ce qui caractérise le vol hypersonique ? Si le passage du vol subsonique au vol supersonique est marqué par le mur du son — cette onde de choc qui se crée au moment où un aéronef dépasse

Toujours plus véloces...



Une maquette de planeur hypersonique est testée dans la soufflerie de l'US Air Force Academy de Colorado Springs, aux États-Unis. Les Américains développent depuis vingt ans plusieurs armes de ce type.

JOSHUA ARMSTRONG/AP/SIPA

l'onde sonore qu'il a formée —, la transition du supersonique à l'hypersonique entraîne des phénomènes physiques plus graduels. Autour de Mach 4, le comportement de l'air devient non linéaire, sa densité et ses capacités thermiques varient. À partir de Mach 7 à 8, la chaleur qui s'intensifie autour de l'engin dissocie les molécules d'oxygène et, à Mach 12, celles de l'azote. « *À des vitesses plus élevées encore, l'air s'ionise et acquiert une charge électrique et des propriétés magnétiques* », explique Naïr Subra, ingénieur système à l'Onera. Lors de la rentrée atmosphérique des vaisseaux spatiaux, c'est ce plasma ionisé qui interdit toute communication pendant de longues minutes. Nul seuil physique ne permet donc de distinguer le vol supersonique de l'hypersonique.

Les très hautes vitesses sont cependant rapidement confrontées au « mur de la chaleur ». À mesure que l'engin accélère, les frottements de l'air sur sa carlingue l'échauffent jusqu'à atteindre des températures de plus de 700 °C à Mach 5 et plus de 3700 °C à Mach 12 ! Quels matériaux résistent à de telles températures ? « *Autour de Mach 5, il est possible d'utiliser des alliages métalliques, de titane ou à base de nickel,* détaille Naïr Subra. *Au-dessus et jusqu'à Mach 8, nous privilégions les céramiques hautes températures, légères, mais fragiles. Pour y remédier, des matériaux composites à matrice céramique associés à des fibres sont aujourd'hui expérimentés.* » Autres solutions testées : des revêtements ablatifs qui évacuent la chaleur en se décomposant, des métaux et alliages réfractaires ou des systèmes de refroidissement actif. Les engins hypersoniques développés aujourd'hui affichent des vitesses allant de 6000 à 25 000 km/h environ (Mach 20). Quel type de propulsion pour de telles poussées ? Les moteurs-fusées peuvent produire une accélération supérieure à Mach 5 en projetant hors de leur tuyère des gaz chauffés par la réaction d'un combustible et d'un comburant — de l'oxygène et du kérosène, par exemple. Mais embarquer deux produits de combustion, soit une masse importante au décollage, s'est révélé un handicap pour les longues distances. En aéronautique, ce problème a été résolu en utilisant le dioxygène présent dans l'atmosphère comme comburant, ce qui réduit d'autant la masse embarquée ; une solution

Les très hautes vitesses sont rapidement confrontées au « mur de la chaleur », la température de la carlingue dépassant 3700°C à Mach 12

dite aérobie. Dans les systèmes aérobies classiques (turboréacteurs, turbopropulseurs, turbines à gaz), l'efficacité de la réaction est obtenue en comprimant mécaniquement l'air avant son entrée dans la chambre de combustion. Mais plus l'air arrive vite, plus sa température s'élève et menace, au-dessus de Mach 3, de faire fondre le compresseur. « *Pour atteindre des vitesses supérieures,* explique Naïr Subra, *il faut se tourner vers les statoréacteurs et les superstatoréacteurs, des systèmes au sein desquels rien ne bouge.* » À partir de Mach 2 en effet, l'air se rue à une telle vitesse dans le réacteur qu'il se comprime naturellement. Le statoréacteur est donc réduit à une entrée d'air, une chambre de combustion dans laquelle le combustible est injecté et une tuyère de sortie des gaz qui assure la poussée. Les statoréacteurs fonctionnent avec de l'air freiné à des vitesses subsoniques. Mais au-delà de Mach 6, il a fallu mettre au point des superstatoréacteurs qui autorisent une combustion supersonique (au-delà de la vitesse du son). L'air est alors ralenti et comprimé mécaniquement à l'aide de rampes qui engendrent des chocs. Ces moteurs ne peuvent toutefois fonctionner qu'à des vitesses supersoniques, qu'il leur faut atteindre en phase initiale grâce à la propulsion d'un lanceur à moteur à poudre ou un d'avion de chasse.

ONERA

« La vitesse et la portance du planeur permettent de reproduire les effets des montagnes russes »

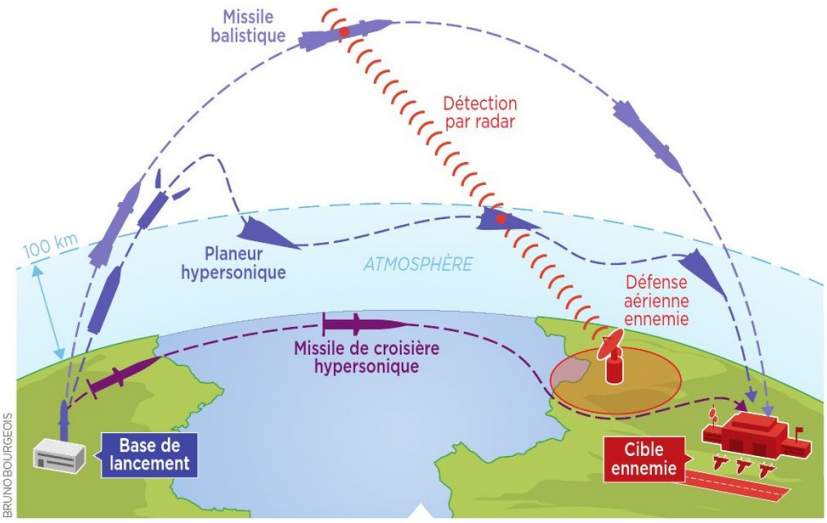
Naïr Subra, ingénieur système à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onera)

La propulsion, un domaine en ébullition

D'autres solutions prospectives sont aussi explorées, tel le moteur à ondes de détonation pulsées. La combustion est ici remplacée par une explosion qui propage des ondes supersoniques de pression, de l'ordre de 30 atmosphères, dans la substance explosive, ce qui permet d'obtenir des vitesses d'éjection des gaz supérieures à Mach 5. Dans le moteur à détonation rotative, les ondes de détonation se déplacent autour d'un anneau et s'auto-entretiennent en raison de cette rotation : un fonctionnement complexe, mais dont le potentiel de poussée est prometteur. « *La propulsion magnétodynamique, encore largement théorique, devrait permettre d'atteindre des vitesses encore plus élevées,* analyse Naïr Subra. *Il s'agirait, aux vitesses supérieures à Mach 12, d'utiliser l'air ionisé sensible aux champs magnétiques, ou d'intégrer à l'air des particules magnétiques, sorte d'engrais aimanté, pour amplifier la poussée.* » D'autres travaux de recherche prévoient d'utiliser la chaleur due à l'échauffement des parois du véhicule pour la réinjecter sous forme magnétique.

Si le type de propulsion choisi définit leur vitesse de frappe, la trajectoire des armes hypersoniques adopte en revanche peu ou prou le même profil. Le missile de croisière hypersonique évolue dans l'atmosphère à une altitude de 20 à 30 km, une zone qui n'est pas la cible des radars de longue distance. Ils peuvent certes le repérer, mais à seulement quelques secondes de sa frappe, ce qui laisse peu de chances de l'intercepter. À l'instar du missile, le planeur a une première phase de propulsion par un lanceur ou un avion qui le conduit à une vitesse hypersonique. Celle-ci le mène hors de l'atmosphère afin de franchir de longues distances sans frottement avec l'air. Lors de sa rentrée atmosphérique, l'air va se comprimer sous le véhicule de forme plate et générer de la portance. « *La vitesse et la portance du planeur permettent de reproduire les effets des montagnes russes : il est possible de convertir la vitesse acquise en chutant dans l'atmosphère pour récupérer de l'altitude,* détaille Naïr Subra. *Ce faisant, le planeur perd de l'énergie et retombe.* » Ces

Des armes aux trajectoires imprévisibles



BRUNO BOURGEOIS

Il existe deux types d'engins hypersoniques. Lancé par une fusée, le planeur effectue un vol en montagnes russes, ce qui le rend moins détectable qu'un missile balistique classique. Le missile hypersonique est encore plus furtif car il évolue à basse altitude.

DÉVELOPPEMENT

Espadon, l'avion hypersonique français

L'aéronef, d'une longueur de 40 m, est conçu pour voler à une vitesse de 6000 à 12 000 km/h (vue d'artiste).

En juin dernier, à l'occasion du salon du Bourget, l'Onera, le centre français de la recherche aérospatiale, a présenté Espadon, le prototype d'un avion hypersonique. D'une longueur de 40 mètres pour une envergure de 15 mètres, l'engin est conçu pour voler à une vitesse de Mach 5 à 10, soit entre 6000 et 12 000 km/h. Il s'agit pour l'Onera — dont l'expérience en hypersonique est principalement axée sur les missiles — d'acquérir une expertise autour de l'avion hypersonique et d'en évaluer les menaces. Espadon a une forme en delta très effilée, ce qui réduit la traînée aux hautes vitesses, assure la stabilité et aide à différer les ondes de choc loin du fuselage. Celui-ci est relativement plat pour assurer une grande partie de la portance, d'habitude fournie par les ailes. « *Pour des questions opérationnelles ou de fonctionnement même du véhicule, il doit voler à une altitude élevée,* indique Naïr Subra, responsable du projet Espadon à l'Onera. *Plus un engin va vite, plus il densifie l'air devant lui — ce qu'on appelle la pression dynamique. En altitude, la densité de l'air est plus faible et on a moins de frottements.* » À Mach 5, un avion hypersonique volerait à 20 km d'altitude, contre 10 km pour les avions de ligne classique. La baisse de densité de l'air est ainsi compensée par la vitesse qui génère de la pression sous l'aile. L'avenir de ce projet dépendra des décisions prises par la direction générale de l'armement.

rebonds sur les couches de l'atmosphère sont imprévisibles pour les défenses adverses. Les contrôles aérodynamiques du planeur lui permettent également de changer de direction à grande vitesse et de semer un missile adverse.

La chaleur intense, talon d'Achille de ces nouvelles armes

En réponse à la thèse du glaive et du bouclier, les États-Unis développent depuis 2020 un système de défense pour contrer ces nouvelles menaces. Le principal talon d'Achille de ces armes est la chaleur intense produite par leur vol, détectable par les capteurs infrarouges de réseaux de satellites ou d'avions. L'utilisation de radars est plus problématique, le plasma généré par les fortes températures absorbant une partie des ondes radar. Une fois l'arme détectée, reste à l'intercepter… Au dernier salon du Bourget, l'entreprise européenne MBDA a présenté Aquila, un missile dédié à l'interception de planeurs hypersoniques. Il s'inscrit dans le programme européen de défense hypersonique Hydis, qui vise à déployer un bouclier d'ici à 2035. Les technologies hypersoniques sont excessivement coûteuses et ne sont aujourd'hui pertinentes que pour neutraliser des systèmes stratégiques de l'armée hostile — systèmes antimissiles, porte-avions, etc. — avant de déployer des modes d'attaque plus conventionnels. ■ **Sylvie Rouat**

* Mach : rapport de la vitesse de vol sur la vitesse locale du son. Mach 1 correspond à 1235 km/h au niveau du sol.

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Humain et machine, vers la grande confusion ?

L'intelligence artificielle pratique le langage naturel avec une aisance confondante. Plusieurs expériences montrent la difficulté de distinguer les textes écrits par des humains et par des chatbots…

C'est un résultat qui en dit long. Pour juger des performances de langage de ChatGPT, deux chercheurs américains en linguistique des universités de Floride du Sud et de Memphis ont eu l'idée de soumettre à pas moins de 72 autres linguistes quatre extraits d'articles de recherche dans cette discipline. Longs de 300 mots, certains avaient été écrits par des chercheurs, publiés dans des revues à comité de lecture, quand d'autres avaient été générés par l'agent conversationnel d'OpenAI en résumant les articles dont étaient issus les extraits. Les linguistes devaient distinguer les uns des autres. Bilan ? Moins de 39 % de bonnes réponses sur l'ensemble des participants. « *La plupart des répondants ont eu deux mauvaises réponses ou plus sur quatre, dans les deux sens* [un article rédigé par un humain désigné comme écrit par ChatGPT et inversement], ajoute J. Elliott Casal, de l'université de Memphis. *Dans l'ensemble, ils ont été meilleurs pour identifier les textes provenant d'un humain que d'une IA.* » Dans le détail, personne n'a su donner quatre bonnes réponses, ils ne sont que 18,1 % à en avoir fourni trois et 34,7 % à avoir vu juste deux fois sur quatre… « *D'un point de vue rhétorique et linguistique, ces textes étaient très stéréotypés et courts, mais nous pensions tout de même qu'il aurait été plus facile que cela de repérer ceux générés par IA* », reconnaît le chercheur.

39%
seulement des linguistes interrogés lors d'une étude sont parvenus à identifier un texte écrit par une IA.

GLEB KALININ

> « Même si vous savez que vous parlez à une machine, vous ferez quand même des projections anthropomorphes sur elle »
>
> **Alexei Grinbaum,** directeur de recherche au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, à Saclay

En matière de langage naturel, la frontière entre humain et machine serait-elle en train de se brouiller? Une autre expérience tend à le montrer. Entre 2022 et 2023, la société israélienne AI21 Labs, spécialisée dans le développement de modèles de langage, a mené un test de Turing géant sous la forme d'un jeu en ligne appelé Human or Not? *(lire l'encadré)*. Sur dix mois, 1,5 million d'utilisateurs ont dialogué pendant deux minutes avec un interlocuteur pour deviner s'il s'agissait d'un humain ou d'un agent conversationnel. Les chatbots étaient bâtis sur plusieurs technologies pour éviter une monotonie de style qui aurait pu servir d'indice. Ils ne répondaient qu'après un délai calqué sur le temps d'une frappe de clavier par un humain, employaient de l'argot, commettaient des erreurs de syntaxe… Et pour parfaire l'imitation, *« certains bots étaient programmés pour quitter abruptement la conversation dans certaines conditions, quand ils se sentaient "offensés" ou quand l'échange devenait répétitif »*, précisait AI21 Labs en mai dernier. Les participants avaient toute latitude pour deviner le statut de leur interlocuteur. Dix millions d'échanges ont été enregistrés, entre humains et intelligence artificielle et entre deux humains. Résultat : 68 % d'identifications exactes d'une l'IA ou d'un humain, et les seuls chatbots ont été débusqués dans 60 % des cas.

C'est peu, surtout dans un contexte si généraliste. Mais, ce genre de démonstration reste dépendant des conditions de l'échange. *« Si vous discutez d'un sujet tout à fait standard pendant trois à cinq minutes, la confusion entre humain et machine est possible,* note Alexei Grinbaum, directeur de recherche au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, à Saclay, et auteur de *Parole de machines* (HumenSciences). *Mais si vous échangez pendant deux heures, que vous abordez 40 sujets différents, vous finirez par savoir que vous êtes face à une IA.* » Des bizarreries surviennent, des répétitions, des transitions bancales… Car ces technologies ne fonctionnent pas sur le sens des mots mais génèrent des groupes de caractères selon un score de probabilité.

POUR EN SAVOIR PLUS

L'article d'AI21 Labs concernant le jeu Human or Not ? :
sciav.fr/922human

Un filigrane pour marquer les textes artificiels

Savoir si l'IA peut passer pour un humain est un faux débat, estime le chercheur. *« Même si vous savez que vous parlez à une machine, vous ferez quand même des projections anthropomorphes sur elle. Vous projetterez des états de connaissance, des émotions… C'est devenu évident avec la nouvelle génération d'outils très performants, et c'est pour cela que le test de Turing est obsolète : même sans confusion entre IA et humain, ces interactions ont des effets sur nous. »*

Ce qui soulève le problème des usages douteux de ces technologies : copies d'examen générées par IA, fausses discussions en ligne, faux documents. D'où des projets en cours de techniques de code à filigranes, capables de marquer automatiquement, par des règles intégrées dans le modèle de langage, des textes créés artificiellement. Ces codes seraient invisibles à l'œil nu mais détectables par un logiciel *ad hoc*. ■ **Arnaud Devillard**

HISTOIRE

Le test de Turing

Dans un célèbre article d'octobre 1950 de la revue *Mind*, le mathématicien britannique Alan Turing se demande si *« une machine peut penser »*. Il imagine un « jeu de l'imitation » : un interrogateur dans une pièce isolée interagit par écrit avec deux interlocuteurs pour deviner lequel est un humain et lequel est un ordinateur. Selon Alan Turing, en 2000, l'interrogateur n'aura pas plus de 70 % de chances de distinguer l'humain de la machine après cinq minutes d'échange. C'est ce que l'on a appelé le test de Turing, mais il s'agit d'une proposition d'outil empirique. En raison de son descriptif sommaire, chacun peut l'adapter comme il veut, ainsi que l'ont fait Hug Loebner, l'inventeur du prix Loebner, jusqu'en 2019, ou le jeu Human Or Not ?. En réalité, Alan Turing lui-même écrit que son jeu ne peut servir qu'à évaluer cette confusion humain-machine, mais pas à déterminer si une machine est intelligente.

JANE HAHN/REDUX-REA

Plantation d'arbres au Sénégal, dans le cadre du projet Grande Muraille verte de lutte contre les effets du changement climatique et la désertification en Afrique. Le reboisement, en favorisant le stockage du CO_2, est aussi un moyen d'alléger le bilan carbone d'une région.

COP28
Alerte sur les puits de carbone

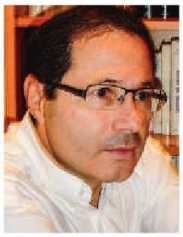
Si l'objectif de maintenir le réchauffement sous les 1,5 °C n'est plus tenable pour cette décennie, la neutralité carbone en 2050 demeure réaliste pour finir le siècle en dessous de ce seuil. Les États disposent de tous les outils pour contrôler leurs engagements. Sauf un : la compensation carbone par des puits naturels. Or notre enquête montre qu'en ce domaine, les engagements sont très loin d'être tenus.

Par Loïc Chauveau

L'heure de vérité. La COP28, c'est-à-dire la 28e session de négociations sur la lutte contre le changement climatique qui s'ouvre le 30 novembre à Dubaï (Émirats arabes unis), est le cadre du « global stocktake ». Ce bilan mondial des engagements pris par les 195 États signataires de la Convention onusienne sur le climat constitue un premier vrai point de départ. Au 4 octobre, 180 États avaient remis leur inventaire des émissions de CO_2 provenant de leur activité économique et listé secteur par secteur — habitat, industrie, transports, agriculture, énergie — leur trajectoire nationale de réduction des gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2030. *« Pour que l'objectif de maintenir la température mondiale à 1,5 °C reste réaliste, nous avons besoin d'une réduction immédiate et forte des émissions dans tous les secteurs et dans toutes les régions »*, a commenté Simon Stiell, le secrétaire exécutif de la convention sur le climat.

Hélas, la communauté internationale est loin du compte. Au moins pour cette décennie. Selon le sixième rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), il faudrait que les émissions de GES baissent de 43 % d'ici à 2030 pour rester à 1,5 °C. Le bilan mondial révèle qu'elles continueront au contraire d'augmenter de 6 % avant de diminuer au début de la prochaine décennie. Un échec. Sauf que les principaux pays émetteurs se sont aussi essayés à l'exercice de la prospective de long terme en définissant leur trajectoire jusqu'en 2050. Une nouvelle notion a ainsi émergé, celle du ▸

« zéro émission nette ». 68 États ont dessiné une trajectoire pour atteindre un bilan carbone neutre au milieu du siècle. Selon le consortium américain Inevitable policy response*, si l'on regarde cette perspective à trente ans, les décisions prises et les objectifs adoptés vont permettre à l'humanité de respecter l'accord de Paris et donc de maintenir la hausse des températures mondiales en dessous de 2 °C d'ici à la fin du siècle. *« Les actions prévues sur le long terme — si elles sont bien mises en œuvre — ne vont pas permettre dans un premier temps de respecter la limite de 1,5 °C qui sera franchie d'ici à dix ans, mais vont bien infléchir la courbe des émissions après, si bien que la hausse ne devrait pas excéder 1,8 °C dans la seconde partie du siècle »*, assène le principal auteur de l'étude, Jakob Thomä. Ce scénario est baptisé « overshoot » *(lire l'encadré ci-dessous)*.


ALAIN KARSENTY

« C'est le retour des indulgences de l'Église du Moyen Âge où l'on était pardonné de ses péchés quand on mettait la main à la poche »

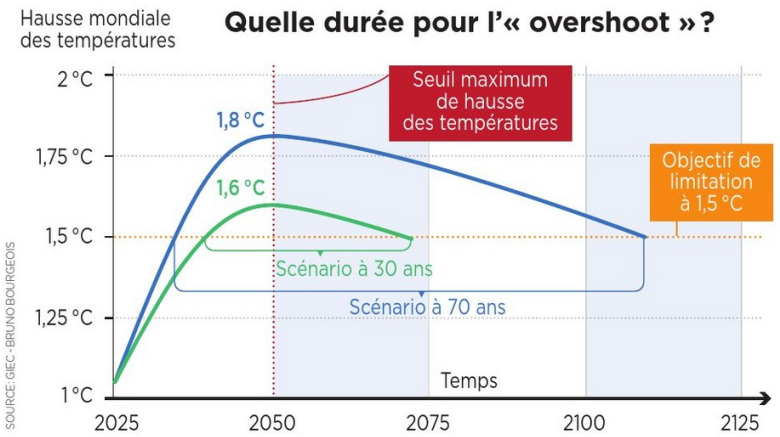
Alain Karsenty, économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)

Si ce bilan mondial a été possible, c'est que depuis 2015 et l'adoption de l'accord de Paris, des milliers d'heures de négociations ont construit ce cadre multilatéral d'action, unique dans l'histoire. Ainsi, en 2018 à Katowice (Pologne), les États se sont entendus sur la « boîte à outils » qui permet la communication des informations sur l'état des lieux des émissions de chacun, la vérification de la sincérité des données transmises à l'ONU, la transparence dans la diffusion des résultats obtenus. Seul domaine où les discussions continuent : la prise en compte cruciale des puits de carbone. Chaque pays va en effet soustraire de son bilan les tonnes de carbone captées par son couvert végétal et forestier ainsi que ses sols. Les gouvernements peuvent donc également agir en reboisant leur territoire ou en adoptant des pratiques agricoles vertueuses pour le climat comme l'agroécologie, qui consiste à cultiver en prenant compte de la vie des sols et de la biodiversité. Reste à encadrer la possibilité d'échanges entre États. Un pays forestier pauvre pourrait ainsi être rémunéré pour la protection de sa forêt. Cette compensation est déjà largement pratiquée dans le secteur privé. Chaque individu peut effacer les émissions d'un voyage en avion, par exemple, en payant pour la plantation d'arbres, au prorata des tonnes émises.

SCÉNARIO

Remettre les progrès à plus tard

Il semble hélas aujourd'hui acquis que l'humanité n'arrivera pas à limiter la hausse des températures à 1,5 °C, du moins dans un premier temps, car les politiques de réduction des émissions et de décarbonation de l'économie peinent à se mettre en place. Les scénarios les plus probables décrivent désormais une trajectoire où les températures dépassent ce seuil pour se stabiliser au cours de la prochaine décennie, et enfin entamer leur descente. Cette pente est bien plus faible et mène à la deuxième partie du siècle. Quelle sera la durée de cet « overshoot » ? Difficile à dire, car cela dépend à la fois de l'efficacité des politiques de limitation des émissions de CO_2 et de l'émergence des techniques de captage de CO_2 à la sortie des usines ou bien directement dans l'air.



La « neutralité carbone », nouvel argument commercial

La principale règle est ainsi celle de « l'additionnalité ». Tout projet doit faire la preuve que les crédits carbone générés appuient des reboisements ou des protections qui, sans cet apport financier ou ces aides spécifiques, n'auraient pu être réalisés. De plus, il y a des risques de « fuites ». *« La crainte, c'est que devant la perspective de protection de certaines zones, les agriculteurs locaux ou les investisseurs internationaux aillent convertir la forêt en espace agricole ou en ranch dans d'autres parties du pays, car les moteurs de la déforestation, comme la fluctuation des prix mondiaux des produits agricoles qui poussent à défricher, ou la croissance démographique, sont tou-*

CARLOS GARCIA RAWLINS / REUTERS

Le programme Three-North Shelterbelt, lancé en Chine dès 1978, a permis d'augmenter la couverture forestière du nord du pays (ici dans un village de la province de Gansu, situé à proximité du désert de Gobi).

jours présents », redoute Alain Karsenty, économiste au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad). Autre problème : une partie du CO_2 persiste dans l'atmosphère au-delà de plusieurs centaines d'années. Les projets de protection ou de reforestation doivent donc pouvoir donner des garanties sur plusieurs siècles. Ce qui est illusoire.

La « neutralité carbone » est devenue un argument commercial et un enjeu d'image tandis qu'elle attire de plus en plus les amoureux du voyage en avion. *« C'est le retour des indulgences de l'Église du Moyen Âge où l'on était pardonné de ses péchés quand on mettait la main à la poche »*, ironise Alain Karsenty. De nombreuses craintes techniques sont cependant tombées, notamment celles portant sur l'évaluation des tonnes de carbone stockées. L'imagerie satellitaire donne une idée précise de la biomasse terrestre, tant dans son étendue spatiale que dans l'estimation de son volume (arbres ou herbes par exemple), à des échelles descendant à quelques dizaines de mètres.

Des crédits carbone certifiés sans effets positifs réels

« L'inventaire par satellite, couplé aux règles de conversion d'un volume de biomasse donné en tonnes de carbone stockées définies par les guides techniques du Giec, donne une estimation réaliste et adoptée partout sur la planète des puits de carbone et de leurs évolutions », affirme Colas Robert, chef de l'unité Utilisation des terres et forêts au Citepa, l'organisme en charge du calcul des émissions françaises. Un organisme vérificateur privé a été créé, Verra, émanation du Forum mondial de Davos et du Climate Group, où l'on trouve des sociétés comme Starbuck, British Petroleum ou l'assureur Allianz. Aujourd'hui, Verra certifie 65 % des crédits carbone émis dans le monde. 45 % sont des projets de reforestation. Tout semble donc en place. Sauf qu'en août, un article publié dans *Science* a jeté un grand froid. Des chercheurs de l'université d'Amsterdam (Pays-Bas) et de Cambridge (Royaume-Uni) ont regardé de près l'évolution sur ces vingt dernières années de sites de certification carbone au Pérou, en Bolivie, en République démocratique du Congo, Tanzanie, Zambie et Cambodge. Ils ont comparé l'évolution de ces placettes forestières avec des zones voisines n'ayant pas bénéficié de ces financements issus du marché volontaire. Les calculs de stockage de tonnes de carbone ne se sont révélés exacts nulle part, à l'exception d'un site péruvien ! Au Pérou et en Colombie, 1266 hectares par an ont été réellement préservés, alors que les crédits carbone délivrés portaient sur 3661 hectares au Pérou et 2550 hectares en Colombie. En Afrique, ce sont à peine 30 hectares par an pour 2700 hectares promis…

BILAN

La forêt française s'épuise face aux sécheresses

La forêt française capte de moins en moins de carbone. Alors que ce puits absorbait 50 millions de tonnes de CO_2 par an en 2000 (soit un peu moins de 10 % des émissions nationales), il a dégringolé à 20 millions de tonnes en 2021. En cause : les sécheresses récurrentes. Les arbres doivent en effet choisir entre la préservation de leur teneur en eau, vitale pour eux, et le stockage de CO_2. Les deux fonctions passent en effet par les mêmes petits trous, les stomates à la surface des feuilles. À l'Office national des forêts (ONF), on estime ainsi qu'à la fin du siècle, la moitié de la forêt française basculera dans des conditions d'existence inadaptées du fait de la hausse des températures. L'inventaire forestier mené par l'Institut géographique national (IGN) constate déjà une augmentation de 30 % du stock d'arbres morts de moins de 5 ans et un dépérissement de certaines essences. La planification écologique devra, entre autres, trancher entre l'utilisation du bois énergie et la préservation de l'efficacité du puits de carbone forestier. Jamais il n'a été aussi crucial de planter toujours plus d'arbres. « *Les espèces actuelles stockent de moins en moins de carbone, alors il n'y a pas d'autres solutions que d'en augmenter le nombre* », résume Albert Maillet, directeur des forêts et risques naturels à l'ONF. La France de 2050 compte sur un puits forestier de 80 millions de tonnes.

MATHIEU CUGNOT / DIVERGENCE

Dans les Vosges, les arbres sont décimés par le scolyte, un ravageur qui croît avec le changement climatique.

« *Est-ce que vous devez acheter ces compensations carbone bon marché quand vous prenez l'avion ?* se demande Julia Jones, professeure des sciences de la conservation à l'université de Bangor (Royaume-Uni) dans un commentaire de l'étude à laquelle elle n'a pas participé. *Malheureusement, il n'y a actuellement que peu de preuves que de le faire rend votre voyage neutre en carbone. Si vous voulez contribuer à la lutte contre le changement climatique, peut-être la seule vraie solution est de ne pas prendre l'avion.* »

Comment expliquer l'écart entre la promesse et la réalité ? « *Les certificats de CO_2 sont générés sur la base de la différence entre un scénario de référence — dans le cas d'une absence de protection de la forêt avec les émissions qui n'auraient ainsi pas pu être absorbées —, et un scénario prenant en compte le projet de protection de la forêt et les émissions évitées* », explique Colas Robert. Le problème réside donc dans le choix de la trajectoire sans crédits carbone. « *Les niveaux de référence consistent, dans certains cas, à prolonger dans le futur les tendances actuelles en l'absence de projet, dans d'autres cas à fabriquer un scénario du niveau de la déforestation future, en fait une prédiction*, critique Alain Karsenty. *Or ces scénarios "sans projet" sont invérifiables puisque les projets vont être réalisés.* »

Faut-il dès lors enterrer la compensation carbone ? En l'état actuel, c'est impossible : elle fait partie de l'accord de Paris, qui reconnaît l'existence du marché volontaire mais veut l'encadrer dans des règles plus strictes. À Dubaï, les négociateurs de la COP28 doivent finaliser les règles d'un jeu déjà commencé. En 2020, la Suisse a signé un accord de compensation carbone avec le Ghana, comptant sur l'outil pour remplir son engagement de réduire de moitié ses émissions de GES dès 2030. Les Émirats arabes unis ont fait de même avec le Liberia. L'état gazier parmi les plus pollueurs au monde compte ainsi sur la forêt africaine pour compenser ses émissions plutôt que d'envisager de sortir des énergies fossiles qui font sa fortune. ■

J. JONES

« Si vous voulez contribuer à la lutte contre le changement climatique, peut-être la seule vraie solution est de ne pas prendre l'avion »

Julia Jones, professeure des sciences de la conservation à l'université de Bangor (Royaume-Uni)

* IPR, sigle derrière lequel figurent des ONG comme Carbon Tracker ou Planet Tracker, mais aussi des groupes financiers comme BlackRock, BNP Paribas Asset management ou l'agence de notation Fitch.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Dessin : www.Mai-Lan.fr

Inventez le monde de demain :
Faites votre thèse avec l'ADEME

PROGRAMME THÈSES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et un cofinanceur public ou privé, l'ADEME finance des thèses pendant 3 ans pour contribuer à la transition écologique.

WWW.ADEME.FR / THESES

Pour **en savoir plus**

Et poser vos questions :
www.ademe.fr

GRAND OCEAN

Innover pour protéger l'océan

La deuxième édition du festival Grand Océan s'est déroulée à Cherbourg les 29 et 30 septembre, avec l'innovation comme fil conducteur. Une quarantaine de scientifiques, historiens, experts se sont mobilisés pour présenter ces nouvelles technologies au service du bien commun.

« *Nous avons pris conscience qu'on ne connaît pas l'océan* », avoue Bruno David, ancien président du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. « *Cela peut paraître paradoxal, mais à force de l'explorer, nous avons une mesure de notre ignorance. Seulement 11* Homo sapiens *sont descendus à 10 000 mètres de profondeur, alors que 12 sont allés sur la Lune !* » Or, parce que le fonctionnement de la planète tout entière dépend de l'océan, ce bien commun de l'humanité, comme le précise d'emblée la Déclaration de Grand Océan élaborée par « cinq sages » (1) *(lire ci-contre)*, il est urgent d'en améliorer la connaissance scientifique. Elle est indispensable si l'on prétend protéger celui qui couvre 70 % de la surface de la planète Terre. « *Comment se comportera l'océan demain, selon les usages que nous en ferons ?* », questionne Françoise Gaill, dès l'ouverture du festival Grand Océan à Cherbourg (2). Quels équilibres veut-on ? « *Géostratégique, économique, environnemental ? C'est à nous, scientifiques, que revient la possibilité de donner un éclairage sur ce que pourrait être le comportement de l'océan à l'avenir* », explique la présidente de l'Ocean Sustainability Foundation. D'où la proposition qu'elle fait d'Ipos (3), une plateforme d'experts qui permettrait « *de mieux savoir ce dont les politiques et divers acteurs de la société ont besoin* » pour comprendre et préserver l'océan. *In fine*, « *pour notre bien commun à tous* ».

« *L'océan nous oblige à être intelligents* » : tel était le slogan de cette deuxième édition du festival. C'est pourquoi la quarantaine de scientifiques, historiens, experts réunis les 29 et 30 septembre à la Cité de la mer ont apporté à l'auditoire moult précisions sur les innovations actuellement mises en œuvre. « *Elles doivent servir à protéger l'océan et non à l'exploiter de façon inconsidérée* », insiste le chef cuisinier Olivier Roellinger. Ces innovations vont ainsi de satellites dédiés à l'observation de l'océan — sa température, sa salinité, le bloom du plancton, les tourbillons… — présentés par Pierre-Yves Le Traon (Ifremer), directeur scientifique de Mercator Ocean International, et Thierry Lafon (Cnes), à sa mise en forme digitale, un « jumeau numérique » explicité par Pascal Lamy, coordinateur du

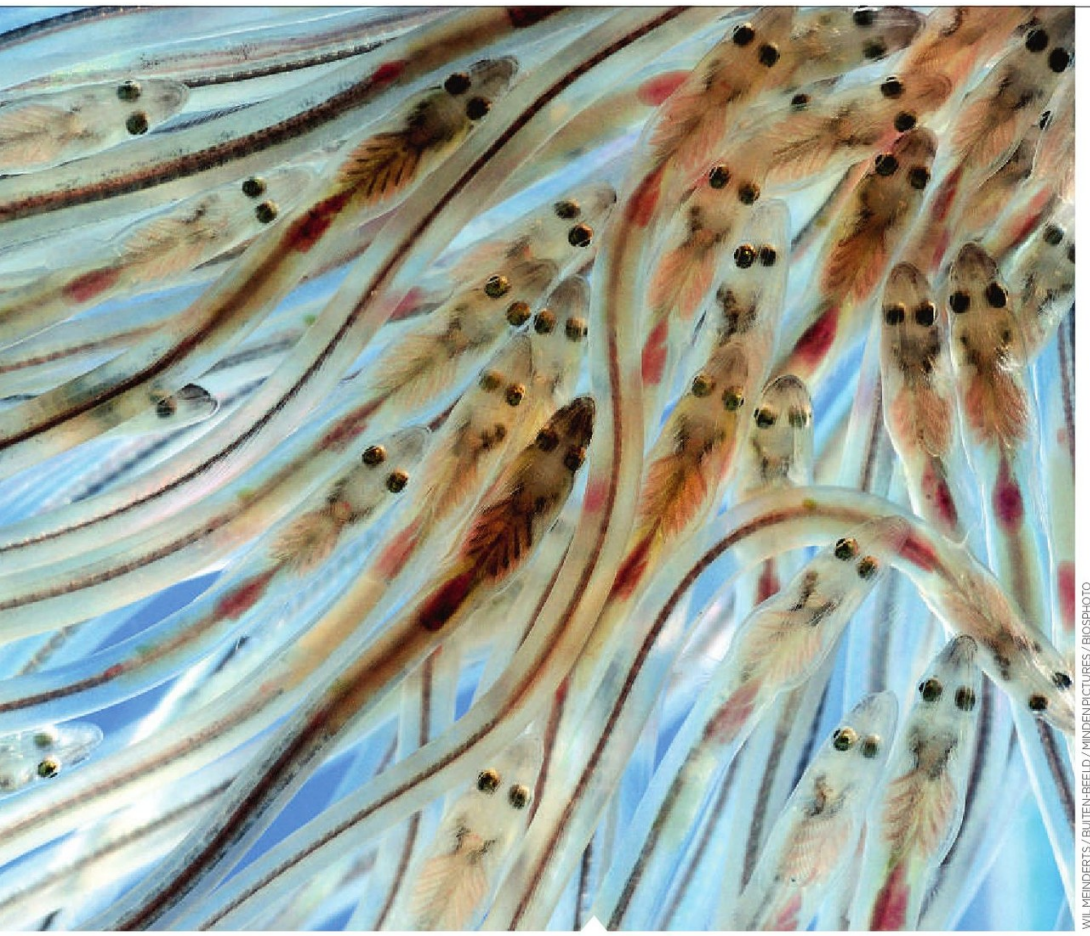
SIPA

ALBERT II
PRINCE SOUVERAIN DE MONACO

« Nous arriverons à protéger d'autres grands espaces »

“Parvenir à un accord sur la haute mer [signé le 19 juin par les États membres de l'ONU avec un objectif de 30 % d'aires marines protégées d'ici à 2030] a nécessité près de deux décennies. Si nous y sommes arrivés, nous arriverons à protéger d'autres grands espaces. Ce sera difficile, notamment sur l'Antarctique où les appétits de grandes nations commencent malheureusement à poindre leur nez. Il faut s'assurer que sa protection soit assurée à long terme comme un espace de science et de paix. Enfin, il est totalement irresponsable d'envisager de soutirer des ressources minières du fond des océans alors qu'il n'y a pas assez de données scientifiques sur ces milieux marins extrêmes. ”

Propos recueillis par M. N.



WIL MEINDERTS / BUITEN-BEELD / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

Classée en danger critique d'extinction, l'anguille européenne est victime de braconnage.

SERGE PICARD/AGENCE VU

« Les anguilles sous roche, il n'y en a plus, ou presque… Alors arrêtons d'en mettre dans nos assiettes ! »

Olivier Roellinger, chef cuisinier et parrain d'Ethic Ocean, organisation environnementale dédiée à la préservation des ressources halieutiques et des écosystèmes marins.

réseau des think tanks Jacques-Delors et pilote de la mission Starfish.

Il y a nécessité de décarboner le transport maritime. Outre les solutions « véliques » (Towt), a été rappelé par Rima Ghemraoui, responsable du département sécurité, écoconception et équipage chez Naval Group, le travail envisagé pour *« alléger les navires, optimiser leur forme afin de les rendre plus hydrodynamiques, ou l'utilisation de biocarburants… »*.

« La nature peut être un guide, nous avons beaucoup à apprendre d'elle, de l'évolution et du vivant », insiste de son côté Patricia Ricard, présidente de l'Institut océanographique Paul-Ricard. La nouvelle mission Bougainville, expliquée par Christophe Prazuck, directeur de l'Institut de l'océan (Sorbonne Université), a ainsi pour objectif *« d'aller observer la vie invisible des océans, qui se révèle foisonnante. Dans un seul seau d'eau, on peut trouver entre 10 et 100 milliards d'organismes microscopiques »*.

L'océan, c'est aussi la mémoire de l'humanité, le plus grand musée du monde qui recèle toutes les traces de civilisation, *« une mémoire engloutie qui mérite d'être protégée et valorisée. Il y a urgence »*, a martelé Michel L'Hour, ancien directeur du département de recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines du ministère de la Culture. Les extraordinaires robots montrés par Vincent Creuze (université de Montpellier) et Oussama Khatib (université Stanford, États-Unis) permettent l'exploration respectueuse des épaves. Il y en aurait 200 000 dans les eaux sous juridiction française.

Romain Troublé, directeur général de la fondation Tara — qui fête ses vingt ans —

La déclaration

L'océan est Un ! Tous les espaces marins sont connectés, le fonctionnement de la planète tout entière en dépend. L'océan est le bien commun de l'humanité.

L'océan, source de connaissances. On connaît mieux la surface de Mars que le fond de l'océan où il reste tout ou presque à découvrir. Il faut accélérer l'exploration scientifique dans tous les domaines de la connaissance, et le faire savoir.

Un océan, source d'innovations. Les solutions fondées sur l'espace océanique sont porteuses d'avenir pour les sociétés humaines. Santé, énergie, alimentation…

L'océan mémoire et avenir de l'humanité C'est le plus grand musée du monde, il recèle toutes les traces des civilisations. Il faut le respecter et le protéger. Tout ce qu'on y jette nous revient, il ne doit pas être le réceptacle de nos déchets. Il doit rester vivant.

Océan durable. L'océan est un miroir sur lequel on peut encore dessiner un futur souhaitable et durable. Il faut faire le strict inverse de nos erreurs passées. La protection doit être la norme, l'exploitation l'exception.

GRAND OCEAN

est venu présenter, lui, la future station polaire que construit CMN à Cherbourg, au côté de Serge Quaranta, P-DG de ce chantier naval. Pour effectuer des mesures *in situ* dans les eaux de l'Arctique, la station polaire devra en effet se montrer capable de résister à l'emprise de la banquise, comme à des températures extrêmes (jusqu'à -52 °C), tout en accueillant confortablement son équipage en toute sécurité !

Un futur observatoire des écosystèmes en Arctique

La construction de la Tara Polar Station a en effet franchi une étape cruciale le 29 septembre, au chantier naval des Constructions mécaniques de Normandie (CMN) à Cherbourg, avec la pose sur la table de montage de la toute première pièce de la station. Les diverses strates du vaisseau sont maintenant assemblées autour de cette « moonpool » : soit un cylindre en aluminium de 1,5 mètre de diamètre qui permettra d'effectuer des prélèvements d'eau jusqu'à 2500 mètres de profondeur depuis l'intérieur confortable du bateau. Cet équipement stratégique servira également de porte d'entrée dans l'océan polaire pour les plongeurs et de futurs drones sous-marins, encore à l'état de projets.

« *Cela lance le début de la construction qui doit s'achever au début de l'automne 2024,* s'enthousiasme Romain Troublé. *Nous aurons ensuite une campagne de tests de trois à quatre mois en milieu polaire et dans des conditions hivernales.* » La première vraie expédition en Arctique est prévue pour la fin de l'année 2025. « *La station doit pouvoir affronter cet environnement hostile tout en maintenant une température intérieure de 18 °C,* souligne Serge Quaranta, *ce qui va nécessiter une forte isolation. La structure du bateau devra aussi résister à la pression et à l'abrasion de la glace. Sa coque est constituée d'une forte épaisseur d'aluminium qui nécessite de nouveaux procédés de soudage.* » Conçu avec l'architecte Olivier Petit, le futur observatoire dérivant de 26 mètres de long comporte 12 cabines. « *Cela permettra à l'équipage hivernal de 12 personnes de pouvoir s'isoler,* explique Romain Troublé. *Au cours de la nuit polaire, les équipiers sont confinés sept mois et demi d'affilée. Cela peut être difficile. L'été, saison durant laquelle on travaille beaucoup en extérieur, la station accueillera 18 à 20 personnes.* » La Polar Station est un projet lancé par Romain Troublé à la suite de la dérive arctique réalisée de 2006 à 2008 par la goélette *Tara*. Il avait alors constaté combien le travail des scientifiques est difficile et dangereux à des températures extrêmes.

Ce nouveau bâtiment aux allures de soucoupe volante permettra d'explorer au long cours le seul océan polaire de la planète, le seul à connaître six mois de nuit et six mois de jour, soit un environnement unique pour des écosystèmes encore très mal connus. Lors de la dérive de *Tara*, le programme scientifique était centré sur la compréhension de la physique des glaces. Ces dernières décennies, l'océan Arctique a surtout vu ses fonds marins cartographiés par les pays voisins. Leur objectif étant de demander l'extension de leur plateau continental au-delà de 200 milles marins, dans la perspective d'en exploiter les ressources.

La station polaire sera dédiée à l'étude de ce milieu fragile et de son évolution au cours des dix missions qui s'y succéderont dans les vingt prochaines années. L'Arctique est en effet un envi-

Polar Station, la station scientifique polaire dérivante de Tara, doit se déployer dans l'Arctique fin 2025. ◄

FONDATION TARA OCEAN

ronnement où les effets du changement climatique sont déjà démultipliés. *« Cela fait dix ans que la Fondation Tara travaille sur ce projet, avec des partenaires monégasques, japonais et, jusqu'à récemment, russes,* souligne Romain Troublé. *C'est un projet véritablement international : il s'agit de réunir les scientifiques des différents États riverains de l'Arctique, pour qu'ils parviennent à un constat commun, seul préalable à une action commune. »* ■

Dominique Leglu et Sylvie Rouat

(1) Bruno David, Françoise Gaill, Michel L'Hour, Patricia Ricard, Olivier Roellinger.
(2) Organisé par *Sciences et Avenir–La Recherche* avec le pôle événementiel Les Échos–Le Parisien, et la participation de *Challenges* et *L'Histoire*. En replay sur www.grandocean-event.com
(3) L'International panel for ocean sustainability pourrait être instauré lors de la conférence des Nations unies consacrée à l'océan en 2025, à Nice.

L'impact de l'éolien en mer sur la biodiversité

Les parcs d'éoliennes « offshore », dont la production d'électricité décarbonée concourt à la lutte contre le dérèglement climatique, doivent aussi respecter l'environnement côtier et marin. Témoignages des représentantes des entreprises EDF Renouvelables et Vattenfall.

GRAND OCÉAN-YOUTUBE

AMANDINE CARRIÈRE

CHARGÉE DES RELATIONS INSTITUTIONNELLES À LA DIRECTION ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES D'EDF RENOUVELABLES

Un effet récif positif d'attraction de la biodiversité

“Pour connaître l'impact sur l'environnement de l'éolien en mer, à Saint-Nazaire et pour nos projets à Fécamp, Courseulles-sur-Mer et Dunkerque, nous consacrons plus de 100 000 euros à un suivi de la biodiversité. Notre équipe d'une dizaine d'environnementalistes bénéficie de surcroît de plus de vingt ans de retour d'expérience internationale — il y a actuellement 6000 éoliennes en fonctionnement en Europe. On a ainsi pu constater que les mammifères marins, éloignés grâce à divers outils pendant la phase de construction du parc, reviennent ensuite. Quant aux pieux des éoliennes, ils jouent un rôle d'épaves en mer.
Dans le parc de Saint-Nazaire mis en service fin 2022, ils ont été colonisés en moins de six mois par des moules, crabes, congres… C'est un « effet récif » positif d'attraction de la biodiversité.”

Propos recueillis par D. J. L.

GRAND OCÉAN/DR

FLORENCE SIMONET

RESPONSABLE DES AUTORISATIONS CHEZ VATTENFALL

Des éoliennes plus visibles par les oiseaux

“Vattenfall, qui exploite des parcs éoliens en mer depuis plus d'une vingtaine d'années, participe avec Skyborn et la Banque des territoires à un 8e appel d'offres pour l'installation d'un parc éolien de 1,5 GW au large de la Normandie, à l'horizon 2032. Attachés à ne pas perturber les écosystèmes, nous menons plusieurs projets : Win@Sea, au Danemark, vise à vérifier qu'un élevage durable de moules et d'algues peut avoir lieu près d'un parc d'éoliennes ; Bareef, qui mesure l'amélioration par des blocs rocheux de la protection des côtes et leur biodiversité, doit nous permettre de savoir s'il faut laisser des structures lors du démantèlement des parcs, parce qu'elles ont créé un « effet récif » ; Intact vise à réduire le risque de collision des oiseaux, en rendant les éoliennes plus visibles, notamment avec des pales peintes en noir.
Par ailleurs, nous innovons (avec l'association The Rich North Sea) avec des formes de fondations destinées à faciliter la mobilité des espèces et améliorer la biodiversité marine.”

Propos recueillis par D. J. L.

JOËL SAGET / AFP

5,2 millions de logements en France étaient considérés comme des passoires énergétiques en 2022, selon le ministère de la Transition écologique.

Cinq questions pour rendre son logement moins énergivore

C'est à la fois un objectif en matière de développement durable, une évidence économique, et maintenant une obligation pour les propriétaires qui veulent louer ou vendre un logement. Encore faut-il faire les bons choix pour l'équipement et l'isolation.

Par Sophie Teisseire, avec Agence Forum News

1 Qu'est-ce qui consomme le plus d'énergie chez soi ?

Le chauffage est, de très loin, la principale consommation énergétique d'un foyer. Il absorbe à lui seul environ les deux tiers de celle-ci, rappelle l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Privilégié aujourd'hui, l'équipement en pompes à chaleur (PAC) des logements est au cœur de la planification écologique du gouvernement, avec une prévision de production d'un million de PAC d'ici à 2027. Rappelons le principe : la pompe à chaleur utilise l'électricité pour capter les calories à l'extérieur du logement, et les transmettre à l'intérieur. Qu'il s'agisse d'une PAC air/eau (comprenant donc également la production d'eau chaude), si vous vous chauffez actuellement au moyen d'une chaudière, ou d'une PAC air/air, en cas de chauffage par radiateurs électriques, cet équipement doit permettre d'avoir une consommation trois à cinq fois moins élevée qu'avec votre équipement actuel (chaudière à gaz, au fioul ou radiateurs électriques), selon le réseau de conseil Hello Watt.

Autre solution performante : le bois. Première source d'énergie renouvelable consommée en France, il compte plus de sept millions d'adeptes parmi les foyers français, selon l'Ademe. Les inserts ou poêles à bûche ou à granulés ont notamment le vent en poupe. Faciles à mettre en place, ceux-ci ont vu leur demande exploser depuis trois ans… tout comme les prix des granulés, à la suite de la guerre en Ukraine.

2 Quels gestes de la vie quotidienne sont efficaces ?

Si l'on n'est pas prêt à dépenser plusieurs milliers d'euros pour rendre son logement moins énergivore, de nombreux gestes de la vie quotidienne ont déjà un impact direct sur sa consommation. Un degré en moins permet d'économiser environ 7 % d'énergie, selon les calculs de l'Ademe. Il faut donc commencer par régler correctement la température à son domicile : entre 19 et 21 °C la journée, 17 °C la nuit ou dans les pièces peu occupées. L'installation de robinets thermostatiques sur les radiateurs, voire d'une horloge de programmation, permet aussi d'ajuster au mieux le chauffage. Par ailleurs, les radiateurs d'appoint sont à proscrire car énergivores. Il faut également entretenir régulièrement la chaudière et penser à purger les radiateurs.

Enfin, il faut entretenir ses appareils ménagers, rappelle l'agence Europe Énergie : ballon d'eau chaude, congélateurs et réfrigérateurs bien remplis avec un dégivrage régulier. L'Ademe invite de son côté à débrancher les appareils au lieu de les laisser en veille, à laver son linge à froid ou à basse température (90 % d'économie si les machines sont classées A ++). Il faut aussi éviter le sèche-linge, et ne pas laisser le robinet ouvert pendant sa toilette (50 % d'économies d'eau chaude).

Installer une pompe à chaleur ?

Ça peut paraître compliqué. Avec l'aide d'*ENGIE Home Services*, c'est tout de suite plus simple.

ENGIE Home Services vous accompagne de A à Z pour l'installation de votre pompe à chaleur. Bénéficiez jusqu'à 8000€[1] d'aides déduits de votre facture.

Appelez le 3102[2] ou allez sur engie-homeservices.fr

ENGIE Home Services

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

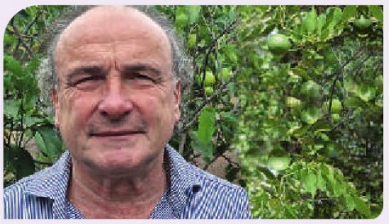
(1) L'opération «Coup de Pouce Chauffage» est définie par arrêté ministériel dans le cadre du dispositif Certificats d'Économies d'Énergie. Voir les conditions sur ecologie.gouv.fr/coup- poucechauffage-et-isolation. L'aide «Coup de Pouce Chauffage» est directement déduite de la facture du client par ENGIE Home Services. ENGIE SA, signataire de la Charte Coup de Pouce Économies d'Énergie, reverse le montant de l'aide à ENGIE Home Services. MaPrimeRénov' est une prime forfaitaire calculée en fonction des conditions de ressources des foyers et du gain écologique induit par la nature des travaux réalisés. Voir conditions sur maprimerenov.gouv.fr. ENGIE Home Services avance le montant de MaPrimeRénov' aux ménages éligibles. Ce montant est directement déduit du devis et donc du montant facturé par ENGIE Home Services au client. La société Économie d'Énergie, en qualité de mandataire, assure le suivi des dossiers auprès de l'Anah et reverse le montant de l'aide à ENGIE Home Services, une fois celle-ci accordée. Voir détails sur https://www.engie-homeservices.fr/particuliers/remplacer/remplacements-chaudiere-par-pompe-a-chaleur. (2) Service et appel gratuits.

ENGIE HOME SERVICES, SAS AU CAPITAL DE 1 121 232€, SIÈGE SOCIAL : 1 PLACE SAMUEL DE CHAMPLAIN 92400 COURBEVOIE, RCS NANTERRE 301 340 584.

AVIS D'EXPERT

PIERRE MATTEI, DIAGNOSTIQUEUR IMMOBILIER ET AUDITEUR ÉNERGÉTIQUE

« Faire des travaux utiles et efficaces »



COLL. PERSONNELLE

Depuis mi-2021, les diagnostics de performance énergétique (DPE) ont vu leur méthode de calcul modifiée. Cela augmente le nombre de logements classés en G — aujourd'hui interdits à la location et dépréciés à la vente —, notamment à Paris. Comment l'expliquer ?
Le DPE actuel est la troisième génération de diagnostics énergétiques qui sont obligatoires depuis 2006. En entrant beaucoup plus de données, la version actuelle se heurte à plusieurs problèmes : d'abord, l'incapacité à renseigner certaines informations. Si le propriétaire ne peut fournir les éléments nécessaires, on considère l'année de construction comme indicateur de l'isolation des murs, par exemple. Or, certains travaux peuvent ne pas correspondre aux normes qui se pratiquaient à l'époque. Ensuite, certains diagnostiqueurs vont trop vite et tous n'ont pas la même formation. C'est ce qui explique qu'on puisse parfois avoir deux lettres différentes sur un même bâtiment, en faisant appel à deux professionnels…

Peut-on quand même faire un bon usage de ce DPE ?
Évidemment ! Il donne aux propriétaires des indications précieuses à la fois sur les dépenses annuelles engendrées par le logement en chauffage et eau chaude — avec un DPE en G, la consommation annuelle est supérieure à 450 kWh/m² —, et sur les conséquences en matière de gaz à effet de serre des choix énergétiques qui sont faits. On voit bien qu'en matière de combustibles, le fioul et le gaz sont pénalisants. L'audit énergétique qui suit le DPE permet de faire des travaux utiles et efficaces.

Est-il vrai que, parfois, on ne puisse pas faire grand-chose ?
Cela peut arriver, surtout dans les immeubles collectifs. En revanche, il est rare qu'on ne puisse pas rendre une maison moins énergivore. ■

Propos recueillis par S. T.

3 Quels choix sont judicieux pour accéder à l'autoconsommation ?

Mieux vaut évidemment concevoir dès le départ le bon type d'énergie pour les logements collectifs ou individuels. Si l'éolien se révèle complexe à mettre en place (et plus encore l'hydraulique), la géothermie de surface, utilisant la chaleur du sol, a de l'avenir, tout comme l'énergie solaire : elles permettent de développer une « autoconsommation » verte. Pour le solaire, le nombre d'installations a doublé en dix-huit mois depuis 2022, essentiellement grâce à des panneaux photovoltaïques d'une puissance de moins de 36 kilovoltampères (kVA), selon Enedis *(lire* S. et A. *n° 915)*. Selon l'Ademe, 25 m² de panneaux photovoltaïques peuvent générer, en un an, environ 2 500 kWh, soit l'équivalent de la consommation électrique (hors chauffage et eau chaude) d'une famille de quatre personnes. Et comme les panneaux solaires de nouvelle génération ont des rendements toujours plus élevés, la facture d'eau chaude devrait même pouvoir baisser de 70 % selon une étude d'EDF.

4 Comment mieux isoler son logement ?

C'est l'investissement le plus rentable : selon l'Ademe, une maison mal isolée, c'est 30 % de déperdition énergétique. Du sol au plafond en passant par les fenêtres, tout doit être passé en revue. C'est maintenant une obligation légale, puisque le diagnostic de performance énergétique (DPE) est devenu nécessaire pour louer ou vendre un bien (*lire interview ci-contre)*. Outre l'isolation par des professionnels du bâtiment, l'achat d'équipements de dernière génération, qui intègrent la préoccupation durable, est aussi à préconiser : nouvelles chaudières à gaz à condensation, ballons thermodynamiques (très économes en énergie), nouveaux verres intelligents qui optimisent leurs propriétés isolantes.

5 Sur quelles aides peut-on compter ?

Elles sont nombreuses ! Principal soutien des ménages, le dispositif MaPrimeRénov' évolue de manière substantielle en 2024. Si le budget global, en forte hausse, s'élève à 5 milliards d'euros, seules pourront en bénéficier les rénovations « d'ampleur », concernant avant tout les « passoires énergétiques », c'est-à-dire les logements classés F ou G par le diagnostic de performance énergétique (DPE). Objectif : 200 000 rénovations complètes sur l'année. Le montant des subventions dépendra à la fois du type de travaux, du niveau de revenu du ménage et de l'efficacité des dépenses pour améliorer le DPE. Attention : pour en bénéficier, les travaux devront avoir été effectués par des entreprises labellisées RGE (reconnues garantes de l'environnement). D'autres aides s'ajoutent à ce mécanisme géré par l'Anah (Agence national de l'habitat) : elles proviennent de collectivités locales et parfois même des fournisseurs d'énergie. S'y ajoutent l'éco-prêt à taux zéro et le taux minoré de TVA (5,5 % au lieu de 20 %). ■

Croisière 100% Francophone

LES JOYAUX CACHÉS DES ÎLES GRECQUES

À BORD DU MS HAMBURG
DU 23 AVRIL AU 2 MAI 2024

Avec la participation exceptionnelle de

CLAUDE SINTES*

Archéologue, conservateur en chef honoraire du Patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS

Par cette croisière nous allons revivre le périple des Grecs de Lesbos, d'Amorgos, de Santorin..., quittant leurs îles sous le patronage d'Apollon de Délos, pour fonder villes et colonies autour de la Méditerranée jusqu'à Nikaïa (Nice) qui sera notre destination finale.

En empruntant le même sillage qu'eux, en visitant certains de leurs comptoirs et les plus merveilleux vestiges qu'ils nous ont laissés, en parlant de leurs dieux, c'est toute cette migration désormais mythique qui va resurgir.

De tout cela je vous parlerai au cours de cette croisière à laquelle j'aurai le plaisir de participer !

Claude Sintès

Pour son itinéraire, la qualité des intervenants et celle des prestations proposées cette croisière est recommandée par Marc SAUGIER, créateur des :

Croisières du SAVOIR SCIENCES AVENIR La Recherche

2 EXCURSIONS OFFERTES♦
POUR LES LECTEURS DE SCIENCES ET AVENIR

À partir de 2 490 € /pers. en cabine intérieure double

Vous retrouverez également à bord nos 3 conférenciers :

OKSANA GARIN*
Spécialiste en Histoire de l'Art, littérature, mythologie et religions

CHRISTINE DARMAGNAC*
Diplômée de l'école du Louvre, de l'Institut d'Art et d'Archéologie

CÉDRIC CABANNE*
Professeur d'histoire géographie, spécialiste en géopolitique

Pour tout renseignement, réservation et demande de brochure de **nos croisières culturelles** contactez

Plein Cap Croisières au **04 93 20 21 20** par courriel à **info@plein-cap.com** ou sur

www.plein-cap.com

PLEIN CAP CROISIÈRES

Une Expérience de plus de 35 ans dans le Maritime

Pour recevoir le programme détaillé merci de renvoyer ce coupon à
Plein Cap Croisières - 251 route de la Colle - 06270 Villeneuve-Loubet
ou ▶

Nom : . . . . . Prénom : . . . . .

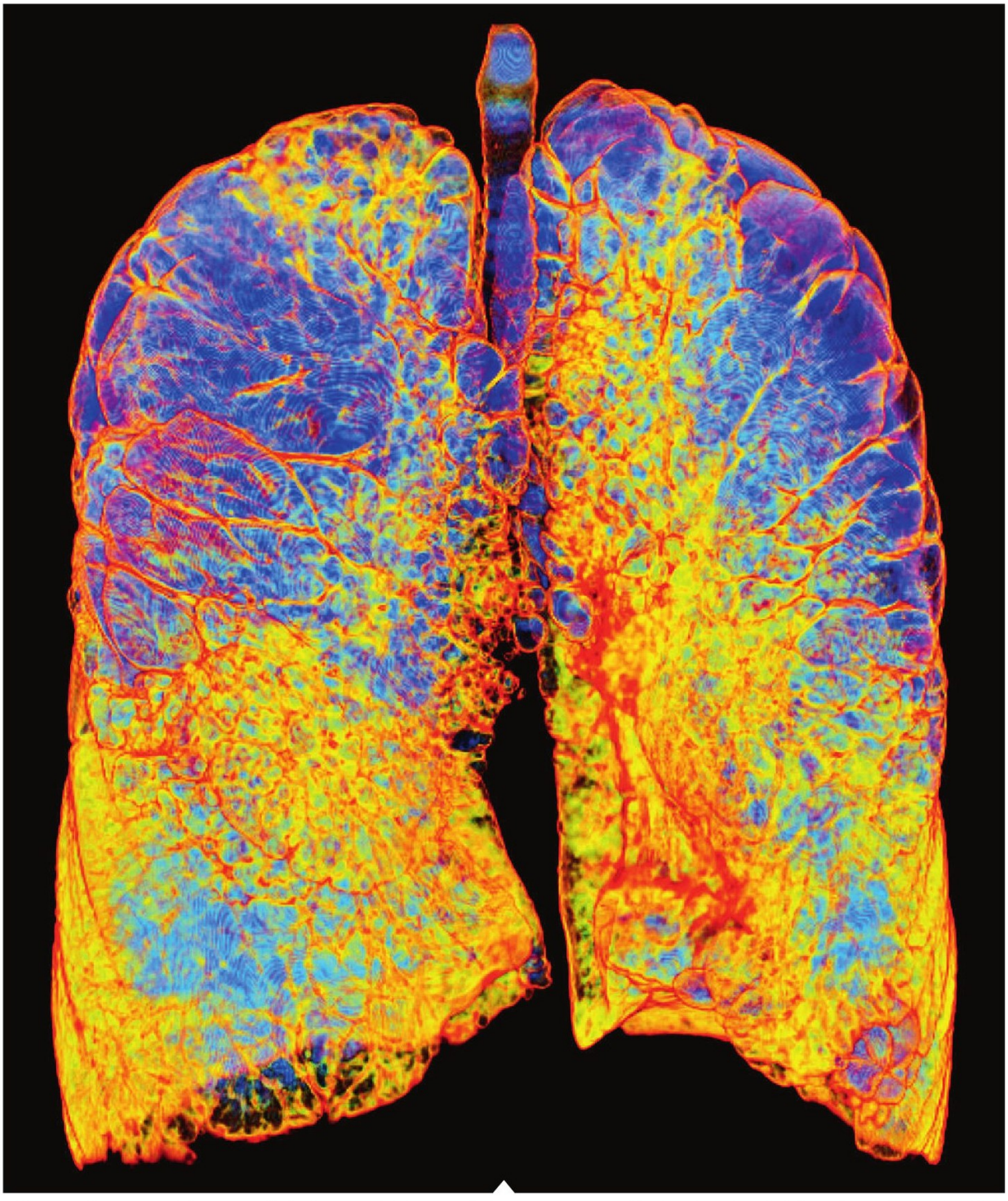
Adresse : . . . . .

Code Postal : . . . . . .Ville : . . . . .

Tél. : . . . . . Courriel : . . . . .

Conformément à la loi « Informatique et Liberté » du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre demande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. Immatriculation IM006120053. Les Conditions Générales de Vente 2024 sont disponibles sur le site www.plein-cap.com ou se reporter à la brochure «L'appel du large 2024». Les conférenciers sont non contractuels, sous réserve de disponibilité. Crédits photos : shutterstock.com/imagIN.gr photography*

♦Offre réservée aux nouveaux inscrits, non rétroactive.



KHFUNG/SPL/SUCRÉSALÉ

L'emphysème est une des deux pathologies caractéristiques de la bronchopneumopathie chronique. Les alvéoles pulmonaires perdent de leur élasticité, se dilatent et leurs parois se dégradent (ici en bleu, vues par tomodensitométrie), rendant la respiration difficile.

Poumons

BPCO, l'épidémie silencieuse

Troisième cause de mortalité dans le monde, cette maladie pulmonaire méconnue du grand public reste peu dépistée alors que le diagnostic est facile à établir. Des thérapies innovantes sont en développement, comme la régénération pulmonaire obtenue grâce aux cellules souches des patients. Pour les cas les plus sévères, la pose de valves à l'intérieur des bronches permet de rétablir un fonctionnement normal des poumons.

Par Sylvie Riou-Milliot

BPCO. Quatre lettres pour désigner la bronchopneumopathie chronique obstructive, une maladie pulmonaire silencieuse et meurtrière : 18 000 décès par an en France, la troisième cause de mortalité dans le monde. Elle concerne près de 500 millions de personnes sur la planète mais plus de la moitié des patients l'ignorent, faute de dépistage. Si depuis vingt ans, en novembre, se déroule la journée mondiale de sensibilisation dédiée à la pathologie, *« il faut bien avouer que tout au long de l'année, il ne se passe pas grand-chose en matière de communication »*, déplore Nicolas Roche, chef du service de pneumologie à l'hôpital Cochin, à Paris. Dommage. *« Car la BPCO est une maladie chronique méconnue, sous-diagnostiquée et très hétérogène, dont les effets s'exercent à deux niveaux, bronchique mais aussi du tissu pulmonaire. »* Pour les patients, les symptômes — toux chronique, crachats — ne paraissent pas inquiétants, surtout s'ils fument ou ont fumé. L'essoufflement, quant à lui, s'installe graduellement sur plusieurs années, si bien qu'il peut presque passer inaperçu. De plus en plus limité dans ses activités, le patient se retrouve vite enfermé dans ce que les spécialistes nomment la *« spirale du déconditionnement »*. En clair, un cercle vicieux où, en bougeant de moins en moins par manque de souffle, il restreint peu à peu son activité physique, comme résigné. Ce qui accentue la perte musculaire, laquelle à son tour aggrave l'essoufflement. Très progressivement, les effets délétères s'accumulent en raison des agressions principalement dues au tabac (85 % des cas), mais aussi aux polluants atmosphériques, aux expositions professionnelles (métiers du bâtiment, secteurs de la fonderie, de la sidérurgie, du textile, ▸

480 millions
de personnes atteintes dans le monde, 600 millions en 2050.

3e
cause de mortalité dans le monde.

3,5 millions
de personnes concernées en France et près de 18000 morts par an.

SOURCES : OMS ET HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ HAS, 2020

ouvriers travaillant dans les silos…) ou domestiques (fumées de cuisson…). Sur le plan physiologique, deux phénomènes se produisent. D'une part, les parois des bronches enflammées s'épaississent, se contractent et produisent plus de mucus, ce qui cause une obstruction bronchique. Dans le même temps, on assiste à une destruction progressive des alvéoles pulmonaires, ces petits sacs au niveau desquels s'effectuent les indispensables échanges entre l'air et le sang *(voir l'infographie ci-contre)*. « *On parle alors d'emphysème,* précise le spécialiste. *Certains patients ont des atteintes plus bronchiques qu'emphysémateuses, et inversement chez d'autres.* »

Bien qu'il s'agisse d'une maladie silencieuse d'apparition insidieuse, le diagnostic pourrait se faire facilement en posant quelques questions très simples. Il existe même un autoquestionnaire *(voir p. 71)* diffusé par la Haute Autorité de santé (HAS) depuis 2020, qui nécessite moins d'une minute : à partir de trois réponses positives, une mesure du souffle par l'intermédiaire d'un appareil dit spiromètre sera nécessaire. En pratique, il s'agira de respirer uniquement par la bouche avec, entre les lèvres, un embout à usage unique muni d'un filtre et relié à un appareil de mesure. Après avoir inspiré le plus d'air possible, il faut souffler aussi fort et longtemps que possible, le but étant de vider complètement ses poumons, au moins pendant six secondes. Selon les mesures, le diagnostic de BPCO sera posé et conduira à d'autres examens. Or, sa réalisation nécessite de l'expérience et une bonne maîtrise de ses critères de qualité, exigeant une formation spécifique. « *Des programmes pilotes ont été proposés, impliquant par exemple la formation de médecins généralistes ou de pharmaciens, mais leur mise en œuvre sur le long terme n'est pas simple* », assure Nicolas Roche.

De nombreuses lacunes dans la prise en charge de la maladie

En février, lors de la tenue du colloque organisé par le Collectif des états généraux de la santé respiratoire, l'ex-ministre de la Santé, François Braun, avait reconnu l'importance de la prévention des pathologies pulmonaires comme la BPCO et le besoin d'un temps au cours de la vie pour faire le point sur son souffle. Cette mesure, l'une des priorités du collectif, prévoyait l'inscription de la réalisation d'un test de mesure de la respiration (spirométrie) lors des nouveaux « rendez-vous prévention », ces consultations médicales gratuites prévues aux trois âges clés de la vie (25, 45 et 65 ans) qui devraient se généraliser sur le plan national dès janvier 2024. Or, à ce jour, l'ajout de ce test n'a toujours pas été validé, bien qu'il semble indispensable au moins chez les personnes

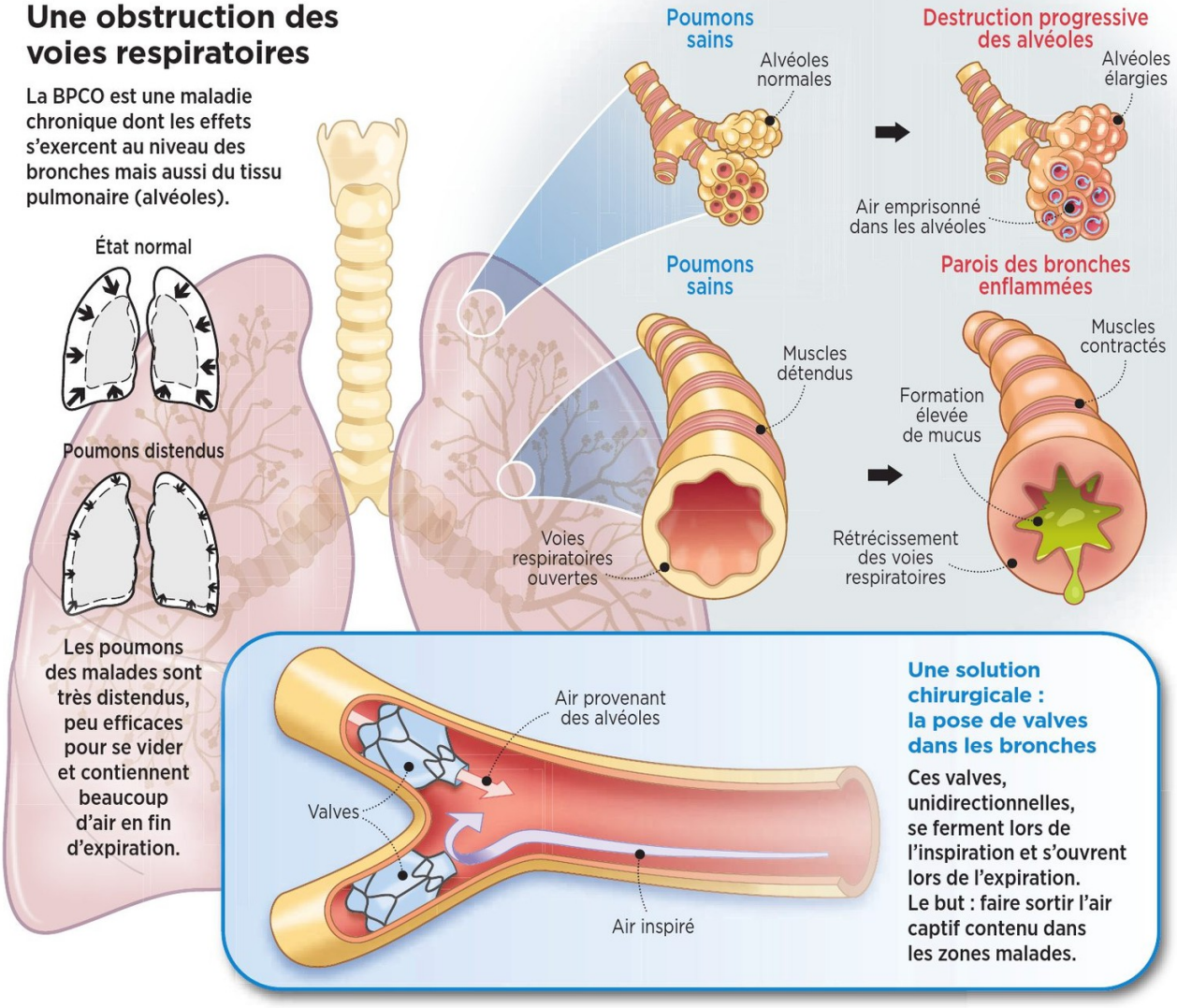
ÉTUDES

De nouveaux facteurs de risque

Longtemps associée aux personnes âgées, la maladie touche pourtant de plus en plus de patients jeunes. De nouveaux facteurs de risque, totalement indépendants du tabac, sont peu à peu identifiés. Des études démontrent que la BPCO commence bien plus tôt que les pneumologues ne l'ont longtemps cru. Au cours des cinq dernières années, plusieurs équipes internationales ont publié des travaux établissant que des anomalies de la croissance des poumons, dont certaines survenant même avant la naissance (prématurité, tabagisme de la mère *in utero*), et plus tard au cours du développement (tabagisme passif, infections respiratoires récidivantes dans l'enfance), constituent des facteurs de risque incontestables de BPCO. Une autre anomalie associée à la survenue d'une BPCO a été révélée par une étude parue en juin 2020 dans la revue *Journal of the American Medical Association*. Il s'agit de la dysanapsie, l'inadéquation entre la taille des poumons et celle des voies aériennes. Dans ce vaste travail, les chercheurs ont regroupé trois études distinctes, soit plus de 6000 sujets, fumeurs et non-fumeurs, présentant ou pas une BPCO, tous répartis sur une trentaine de sites (États-Unis, Canada). Au moyen de scanners réalisés sur l'ensemble de ces personnes, ils ont ensuite cherché à évaluer l'impact de cette dysanapsie sur la présence d'une BPCO. Résultat : le risque de développer la maladie était multiplié par huit chez des personnes ayant des bronches trop petites proportionnellement à la taille de leurs poumons.

Une obstruction des voies respiratoires

La BPCO est une maladie chronique dont les effets s'exercent au niveau des bronches mais aussi du tissu pulmonaire (alvéoles).



à risque. Il s'agit de l'une des très nombreuses lacunes dont souffre à ce jour la prise en charge de la BPCO. C'est ce que pointait la HAS en 2022, avec la première analyse de sept indicateurs (dépistage, suivi des patients stables ou après une première hospitalisation, etc.) mettant au jour plusieurs insuffisances : celle du dépistage par spirométrie réalisé chez seulement 21 % des personnes à risque et 34 % des patients déjà diagnostiqués ; celle du suivi par un pneumologue, effectif dans seulement 30 % des cas, ou encore celle de la vaccination antigrippale pratiquée chez un patient sur deux et pourtant essentielle, en raison du risque de surinfection chez ces personnes déjà fragilisées par la maladie. Autant de chiffres qui témoignent d'*« une méconnaissance et d'une banalisation des signes, tant du côté des médecins que des patients,* signale Nicolas Roche. *Des études ont montré par exemple que lorsque des médecins généralistes conseillent à des patients nouvellement diagnostiqués de voir un pneumologue, le conseil n'est suivi que dans 50 % des cas.* »

Si le dépistage peine à progresser, des approches thérapeutiques originales se dessinent du côté de la prise en charge. C'est le cas de la chirurgie, avec la pose de valves à l'intérieur même des bronches. Développée depuis quelques années, cette technique est destinée à des patients très essoufflés. Elle a déjà été utilisée auprès de plus de 25 000 patients dans le monde, dont près de 1200 en France. De quoi s'agit-il ? *« Ce traitement repose sur la réduction de volume des zones concernées par l'emphysème,* détaille le Pr Charles-Hugo Marquette,

BRUNO BOURGEOIS

A. REEVE/SPL/SUCRE SALÉ

LA LOUVIERE / ASTIER / BSIP

La spirométrie, test de mesure de la respiration, permet de poser un diagnostic fiable de BPCO (à gauche). Lorsque la pathologie est installée, un suivi régulier de la capacité respiratoire est effectué au repos et lors d'exercices physiques (ci-dessus).

chef du service de pneumologie au CHU de Nice, l'un des premiers en France à s'être intéressé à cette technique. *Les poumons des malades emphysémateux sont très distendus, peu efficaces pour se vider, et contiennent beaucoup d'air en fin d'expiration, parfois 5 litres au lieu de 2 normalement, soit l'équivalent du volume d'un ballon de rugby dans la poitrine. Pendant longtemps, ces zones d'emphysème étaient retirées par voie chirurgicale, mais la survenue de complications sérieuses a conduit au développement de techniques mini-invasives comme les valves.* » Elles sont constituées d'un maillage en nitinol, un alliage de nickel et de titane recouvert de silicone, et leur particularité est d'être unidirectionnelles, c'est-à-dire qu'elles se ferment lors de l'inspiration et s'ouvrent lors de l'expiration *(voir l'infographie p. 69)*. « *Leur pose a un objectif bien précis : faire sortir l'air captif contenu dans les zones malades pour qu'au final elles se rétractent et fassent de la place aux zones saines et assurent une meilleure ventilation* », explique le pneumologue. En pratique, il s'agit de disposer à l'entrée des bronches, au moyen d'un endoscope souple introduit dans la bouche sous anesthésie générale, plusieurs valves stériles (Zephyr R, de PulmonX, est le seul dispositif agréé en France et intégralement remboursé depuis 3 ans par l'Assurance-maladie). Plusieurs tailles permettent de s'adapter à toutes les anatomies. Un parcours d'éligibilité très sélectif est entrepris avant la pose et plusieurs examens (scanner, pléthysmographie mesurant l'ensemble des volumes pulmonaires) sont réalisés en milieu hospitalier, en lien avec la trentaine de centres implanteurs dans l'Hexagone. « *Quand les critères de sélection des patients sont respectés, le taux de réussite est d'environ 50 %,* estime Charles-Hugo Marquette. *Ces valves pourraient concerner plusieurs dizaines de milliers de patients par an en France ; malheureusement, la plupart arrivent trop tard dans les circuits de soin.* »

Des cellules régénérées réintroduites dans les poumons

D'autres innovations à plus long terme se profilent. Présenté lors du dernier congrès européen de pneumologie, qui s'est tenu à Milan en septembre, le travail d'une équipe de l'université Tongji à Shanghai (Chine), bien que très préliminaire, semble ainsi prometteur. Il s'agit de la première régénération pulmonaire obtenue grâce aux propres cellules souches des patients. Un premier pas vers le rêve des pneumologues : refabriquer un poumon fonctionnel. Les chercheurs se sont intéressés à certaines cellules souches présentes chez les patients, les progénitrices P63+,

TRAITEMENTS

Médicaments : la piste des biothérapies

Aucun traitement à ce jour ne guérit la BPCO. En revanche, il existe des traitements pour diminuer la fréquence et la sévérité des symptômes respiratoires (toux, essoufflement, crachats…). Il s'agit de médicaments inhalés facilitant le passage de l'air et qui s'opposent à la constriction des bronches ou renforcent leur dilatation. Selon les cas, ils peuvent être associés à des corticoïdes également inhalés. Mais de nouvelles molécules, injectables cette fois, sont à l'étude. Appelées biothérapies et communes à celles développées dans l'asthme *(lire* S. et A. *n° 891)*, elles ciblent principalement les réactions inflammatoires déclenchées par l'action sur l'épithélium respiratoire des allergènes ou des polluants (tabac, particules). Elles sont en cours d'évaluation et les résultats sont attendus en 2024 et 2025.

connues chez l'animal pour leurs capacités de réparation pulmonaire. Les médecins ont collecté ces cellules avec un cathéter introduit dans les bronches de 17 patients. Les cellules ont ensuite été multipliées avant d'être retransplantées dans les poumons respectifs des patients et par la même voie. Selon la présentation du Pr Wei Zuo, deux patients ont vu leur qualité de vie s'améliorer, tout comme la distance qu'ils ont parcourue lors d'un test de marche de six minutes : 410 mètres avant le traitement contre 447 mètres à 24 semaines. Un essai plus vaste doit démarrer. « *Ces résultats sont encourageants, car la BPCO a désespérément besoin de nouveaux traitements plus efficaces* », commentait à Milan le Pr Omar Usmani, pneumologue à l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni).

Des médicaments plus spécifiques de la BPCO que ceux prescrits aujourd'hui sont par ailleurs en cours de mise au point. Ils font l'objet d'essais cliniques dans des groupes importants de patients, des essais de phase 3. Ces molécules, dites biothérapies, pourraient être disponibles d'ici un an *(lire l'encadré ci-contre)*. Elles ne concerneront toutefois que peu de patients, moins de 10 % de la totalité des cas, les plus sévères.

Ces approches sophistiquées ne doivent cependant pas faire oublier ce traitement élémentaire que constitue le reconditionnement physique, validé depuis plusieurs années dans toutes les recommandations. Cet été, un exploit cycliste a été réalisé par un patient, Philippe Poncet. Atteint de BPCO depuis plusieurs années et sous oxygène 24 heures sur 24, il a créé en 2013 l'association O2&CIE Urgence BPCO pour alerter le public sur les effets de sa maladie. Sous assistance respiratoire, il a parcouru 100 km en 6 heures. Une véritable prouesse qui pourrait motiver d'autres patients BPCO à se remettre au sport. ■

AUTOQUESTIONNAIRE

5 questions pour aider au diagnostic

1. Toussez-vous souvent (tous les jours) ?
2. Avez-vous souvent une toux grasse ?
3. Êtes-vous plus facilement essoufflé que les personnes de votre âge ?
4. Avez-vous plus de 40 ans ?
5. Avez-vous fumé ou fumez-vous ?

Deux réponses positives constituent un signal d'alarme, trois doivent conduire à une mesure du souffle avec un spiromètre et à une consultation chez un pneumologue.

Comment les rythmes circadiens régulent notre santé

Longtemps négligée, l'étude des cycles biologiques de l'organisme intéresse de plus en plus les chercheurs. Car le dérèglement de notre horloge circadienne peut avoir des conséquences majeures sur la santé physique et mentale. Explications.

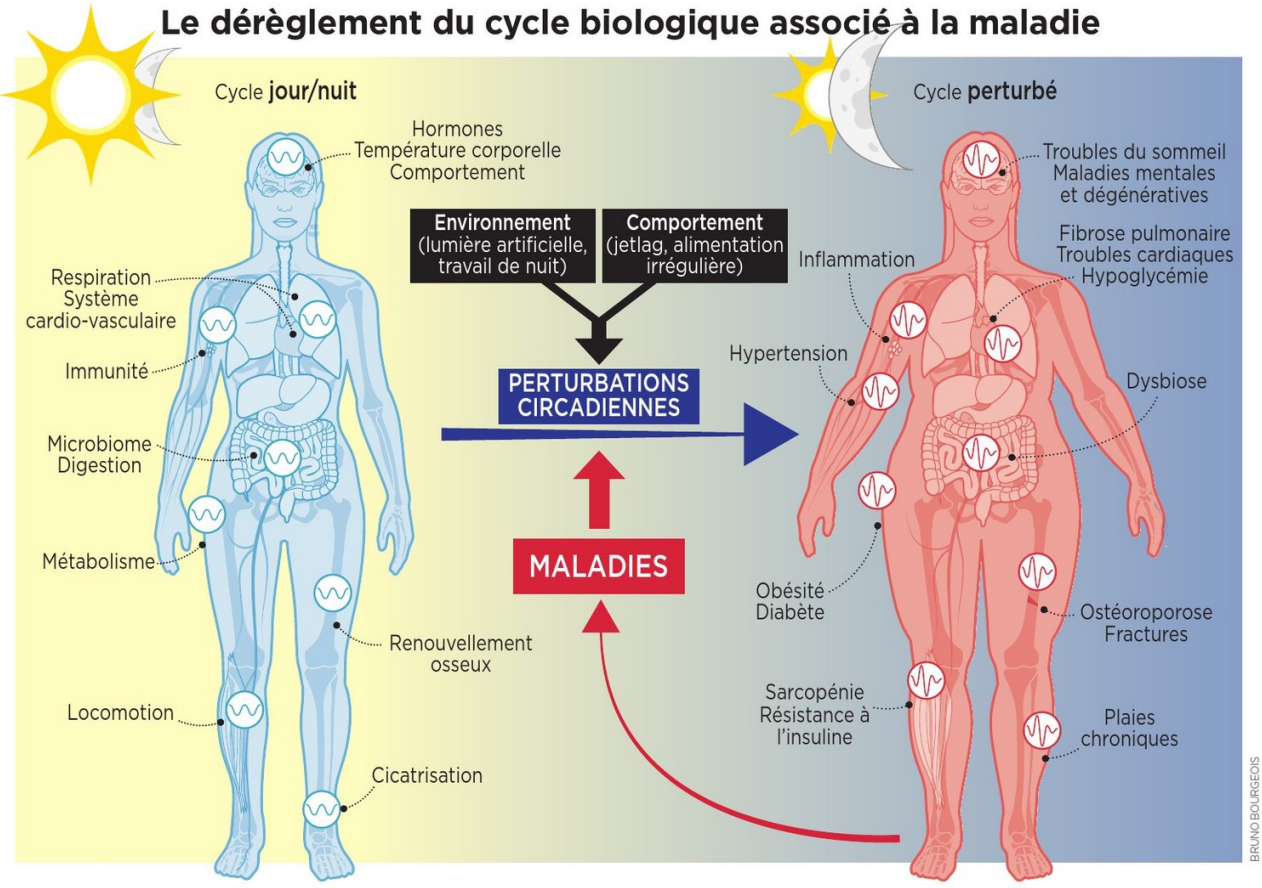
Nos corps ont le sens du rythme. Des rythmes même, puisque presque tous nos organes sont dépendants d'horloges circadiennes, des mécanismes présents dans nos cellules et contrôlés par des gènes spécifiques fonctionnant sur des cycles d'environ 24 heures. Qu'il s'agisse de notre métabolisme, de nos systèmes immunitaire et cardiovasculaire ou encore de notre sommeil, toutes nos fonctions biologiques sont soumises à ces rythmes circadiens. Des perturbations de ces horloges internes s'avèrent aujourd'hui avoir des conséquences majeures sur notre santé, physique comme mentale. Cancers, altérations des fonctions cognitives, dépression, troubles de l'humeur, obésité, diabète voient leurs risques de survenue et leur gravité augmentés lorsque ces horloges internes viennent à se dérégler. Chez des patients souffrant de pathologies neurodégénératives, comme la maladie d'Alzheimer, de Huntington ou de Parkinson, les médecins observent un dysfonctionnement de l'expression des gènes d'horloge affectant notamment la sécrétion de mélatonine, une hormone dont la production est circadienne. Les patients souffrant d'Alzheimer sont ainsi notablement plus agités et instables en fin d'après-midi ou dans la soirée. Et c'est l'inverse pour les diabétiques dont un dysfonctionnement dans la sécrétion de l'insuline conduit à une aggravation des symptômes en matinée. Des dérèglements de rythme pourraient également aggraver certaines maladies mentales. On sait par exemple que 80 % des patients souffrant de schizophrénie présentent des troubles du sommeil et des rythmes circadiens.

Longtemps négligée, l'étude des rythmes biologiques de l'organisme a gagné de plus en plus d'importance ces dernières années. « *Jusqu'à récemment la chronobiologie n'était pas vraiment considérée,* expose Étienne Challet, directeur de recherche CNRS à l'université de Strasbourg. *Heureusement, on en parle de plus en plus depuis l'obtention du prix Nobel de physiologie ou médecine décerné en 2017.* » Cette année-là en effet, trois chercheurs américains ont été récompensés pour avoir mis en évidence des gènes impliqués dans le rythme circadien de la drosophile. Or, et c'est bien là le signe de l'importance du mécanisme, il est remarquablement conservé au cours de l'évolution. « *Tous les organismes vivants, de la mouche à l'être humain, en passant par les plantes, ont des rythmes bio-*

EBRS

« Tous les organismes vivants ont des rythmes biologiques, qu'ils soient journaliers ou saisonniers »

Valérie Simonneaux, directrice de recherche CNRS à l'université de Strasbourg

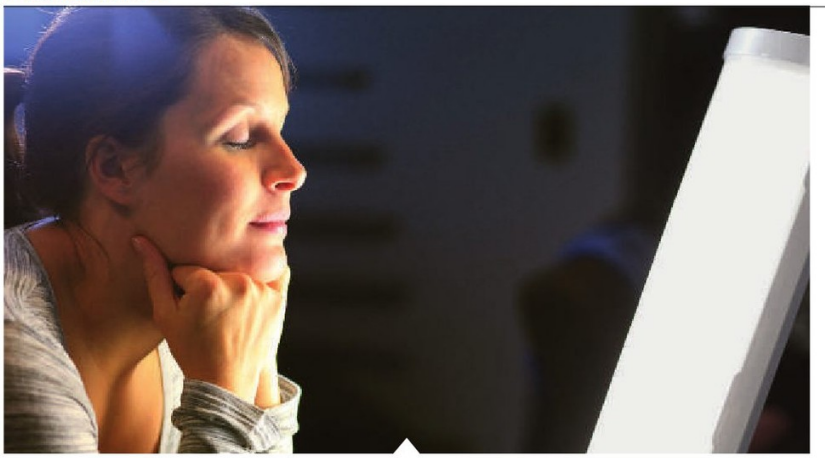


La perturbation du rythme circadien peut augmenter le risque de maladies (à droite). Mais à leur tour, les maladies peuvent elles aussi aggraver les pathologies liées au dysfonctionnement du cycle biologique.

logiques, qu'ils soient journaliers ou saisonniers, abonde Valérie Simonneaux, directrice de recherche CNRS à l'université de Strasbourg. *Même des organismes très simples comme les bactéries expriment des rythmes biologiques. Récemment, on a même montré que des interactions entre protéines pouvaient présenter des rythmes journaliers.* » Rien d'étonnant, donc, à ce que les centaines de milliards de bactéries que nous hébergeons puissent être elles aussi touchées et affecter en retour notre organisme. « *Le microbiote bactérien est modifié par le rythme de prise alimentaire de l'hôte et, en retour, influence les horloges de celui-ci,* poursuit Étienne Challet. *Son dérèglement favorise les risques de diabète et d'obésité. En outre, il a été montré chez des rongeurs que, lorsqu'on déséquilibre le cycle veille-sommeil, cela favorise leur vieillissement cellulaire.* »

Un chef d'orchestre qui a son propre « tempo »

Seulement, nos horloges internes, si elles ont des rythmes propres, sont également soumises à des facteurs extérieurs qui influencent ces mécanismes d'horlogerie biologiques. Et c'est une bonne chose car l'horloge interne principale dans le cerveau, le chef d'orchestre de tous ces rythmes dans l'organisme, possède son propre « tempo » : 24 h 10 min en moyenne — il varie toutefois selon les individus entre 23 h 30 min et 24 h 30 min. Nichée dans l'hypothalamus chez l'être humain, cette horloge principale est composée de deux noyaux suprachiasmatiques (NSC) d'environ 50 000 neurones chacun. Et dans chacune de ces cellules, le mécanisme d'horloge est constitué de gènes spécialisés, justement nommés « gènes de l'horloge ». Si ce chef d'orchestre était insensible aux facteurs extérieurs, il conduirait donc son porteur à se décaler toujours un peu plus chaque jour. Pour demeurer en phase avec l'environnement, l'horloge interne a donc besoin d'être resynchronisée en permanence. Principal agent régulateur : la lumière, qui permet aux humains de rester en phase avec l'alternance jour/nuit de leur planète. C'est le plus puissant des synchroniseurs, mais



PHILIPPE TURPIN/PHOTONONSTOP

La lumière permet à notre horloge interne de bien se synchroniser sur l'heure de la journée.

il en existe d'autres comme la température, l'activité physique ou le fait de se nourrir qui indiquent à nos différents organes, cœur, foie, poumons, muscles, etc., à quel moment de la journée ils se trouvent. Les horloges périphériques situées dans les différentes parties de notre corps sont normalement menées à la baguette par le chef d'orchestre des NSC qui donne la mesure. Seulement, que se passe-t-il quand les différentes horloges n'agissent plus de concert et se trouvent désynchronisées? Des troubles circadiens se mettent alors en place en quelques jours, perturbant le bel ordonnancement de l'organisme.

C'est ce qu'il se produit par exemple chez les travailleurs postés aux horaires atypiques. Le travail de nuit conduit à une désynchronisation de l'horloge biologique. Exposition à la lumière et sommeil ne sont plus en phase. Pas plus que les moments où l'on se nourrit, ou ceux durant lesquels le corps est en mouvement. Bref, c'est la cacophonie, l'organisme ne sait plus quelle heure il est, avec des conséquences notables sur la santé. Une expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) concluait ainsi en 2016 que le travail de nuit est un facteur de risque probable de cancer. Elle pointait également du doigt une altération des performances cognitives, une augmentation des risques de diabète de type 2, d'obésité et d'hypertension artérielle chez les plus de 3 millions de personnes qui travaillent occasionnellement ou régulièrement de nuit. *« Chez les femmes, des études épidémiologiques ont montré que le travail posté pouvait occasionner une irrégularité du cycle menstruel,* renchérit Valérie Simonneaux. *Avec mon équipe, nous avons comme projet de suivre les données biologiques de l'ovulation chez des femmes travaillant en horaires postés. Cela nécessite la mise au point d'outils non invasifs de mesure des niveaux hormonaux afin de regarder au jour le jour les cycles d'activité ovariens.* »

Par ailleurs, des dérèglements des rythmes circadiens ont aussi des conséquences sur le système immunitaire et la lutte contre les maladies infectieuses. *« Nous avons découvert chez la souris qu'une infection par le parasite* Leishmania *(agent de la leishmaniose) était plus grave si elle se produisait en soirée et conduisait le système immunitaire à réagir plus fortement »*, explique le professeur Nicolas Cermakian, de l'université McGill et du centre de recherche Douglas à Montréal (Canada). Que le système immunitaire soit sous le contrôle des horloges circadiennes aurait même une influence sur la réponse à la vaccination, variable selon l'heure du jour. *« Lorsque des souris reçoivent le traitement en milieu de jour,* poursuit-il, *les lymphocytes T répondent plus fortement qu'à toutes les autres heures du jour et de la nuit.* » Conclusion du chercheur : certains vaccins nécessiteraient des études pour déterminer le moment d'administration le plus approprié afin d'augmenter leur efficacité.

Des médicaments plus ou moins actifs selon l'heure

En considérant que la moitié de nos gènes sont rythmés, la médecine et la pharmacopée auraient tout à gagner à prendre en compte les différents temps de notre corps. *« Parmi les 100 médicaments les plus prescrits, pas moins de 56 ont pour cible une molécule de l'organisme qui est rythmée, ce qui suggère qu'ils pourraient être plus ou moins actifs selon le moment où ils sont administrés,* ajoute Nicolas Cermakian. *La médecine circadienne consiste à prendre en compte les rythmes de nos organismes. Le domaine n'en est qu'à ses débuts mais je suis convaincu que cela va se développer dans les prochaines années et cela permettra notamment de personnaliser les traitements.* » ■ **Hervé Ratel**

RECOMMANDATIONS

Comment recaler nos horloges

Une bonne hygiène de vie devrait inclure une bonne hygiène circadienne. Se coucher à une heure raisonnable dans le noir et au calme. Respecter les cycles lumineux et ne pas abuser le soir des écrans d'ordinateur, de téléviseur ou de téléphone mobile. Attention également aux rythmes des prises alimentaires qui contribuent à synchroniser ou, au contraire, à perturber nos horloges. Du côté pharmacologique, la mélatonine représente un enjeu clinique important et est actuellement recommandée dans les décalages horaires, certaines situations de travail de nuit, ainsi que dans des troubles autistiques ou du déficit de l'attention. D'autres molécules en développement ciblent la mécanique de l'horloge biologique et pourraient avoir un intérêt dans certains troubles circadiens.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

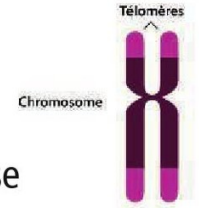
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

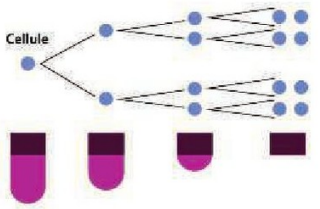
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

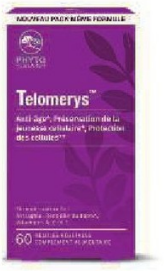
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 50 33 36** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ :
Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Poivre et piment, chaud devant !

Ils apportent en petites quantités de nombreux minéraux et oligo-éléments, ainsi qu'une grande variété d'antioxydants. Et en rehaussant le goût, cette épice et ce condiment permettent de limiter l'utilisation du sel en cuisine.

Noir de Tellicherry (Inde), vert de Madagascar, rouge de Kampot (Cambodge), blanc de Penja (Cameroun)… Le poivre invite au voyage. Si la réglementation française n'autorise l'appellation « poivre » que pour les fruits issus des poivriers de la famille des pipéracées (*Piper nigrum*, *Piper longum*, *Piper cubeba*, etc.), ce roi des épices, originaire d'Inde, se distingue d'autres baies telles celles de Sichuan (*Zanthoxylum piperitum*), provenant de Chine ou de Timur du Népal (*Zanthoxylum armatum*), ou encore les baies roses (*Schinus terebinthifolius*). Le piment (famille des solanacées), frais, sec ou en sauce, s'impose lui aussi sur les étagères de nos cuisines, qu'il soit doux et subtil comme le paprika, ou fort et explosif comme le piment oiseau. D'autant qu'en plus de ses capacités à exalter les saveurs d'un plat, il possède, comme le poivre, de nombreux bienfaits nutritionnels et pour la santé.

Une échelle du piquant

L'échelle de Scoville, mise au point en 1912 par le pharmacologue américain Wilbur Scoville, mesure la force des piments. Celui d'Espelette affiche 1000 à 3000 unités Scoville ; le piment oiseau et la harissa (purée de piments rouges) 30 000 à 60 000 unités ; le piment habanero, 150 000 à 325 000 unités ; le Dragon's Breath, 2,48 millions d'unités. Depuis 2017, le piment le plus fort au monde (répertorié dans le *Guinness des records*) est le Pepper X, avec 3,2 millions d'unités sur l'échelle de Scoville. À noter que la capsaïcine — responsable du piquant — étant lipophile, il est conseillé, pour couper le « feu » d'un piment,

245 tonnes
de poudre de piment d'Espelette ont été produites en 2022 au Pays basque.
(SOURCE : SYNDICAT DU PIMENT D'ESPELETTE AOP.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

POIVRE Épice qui se décline selon le degré de maturité : vert (grain immature), noir (légèrement immature), rouge (maturité optimale) ou blanc (maturité optimale, sans péricarde). Le poivre gris est un mélange de poivres blanc et noir moulus.

ÉCHELLE DE SCOVILLE Échelle de mesure dont l'unité est le nombre de dilutions nécessaires d'une purée de piments frais pour ne plus percevoir de sensation de brûlure.

CAPSAÏCINE Alcaloïde responsable de la sensation de brûlure et de chaleur occasionnée par la consommation de piment.

de le consommer mélangé à une matière grasse (lait, huile, crème fraîche, etc.).

C'est une bonne source d'antioxydants

Poivres et piments apportent en petites quantités de nombreux minéraux et oligo-éléments : fer, magnésium, phosphore, calcium (2,6 mg pour 1 g de poivre blanc) ou potassium (16 mg/1 g de poivre noir). 10 g de piment de Cayenne fournissent aussi 7,6 mg de vitamine C, 3 mg de vitamine E, 8 µg de vitamine K et 10 µg de vitamine B9 (1). Tous possèdent également une grande variété d'antioxydants. Pour les piments, la capsaïcine, la quercétine et la lutéoline, et pour les poivres, la pipérine (qui donne le goût piquant), le bêta-carotène, les acides laurique et myristique. À noter que les huiles essentielles (sabinène, alpha- et bêta-pinène, limonène, etc.) qui confèrent au poivre son arôme et son goût spécifiques représentent jusqu'à 3,5 % du fruit (2).

Le piment serait bénéfique pour le cœur...

Consommer des piments rouges forts serait associé à une réduction de 13 % du risque de mortalité prématurée, principalement liée aux maladies cardiaques ou à l'accident vasculaire cérébral (3), d'après des travaux américains. Selon une étude plus récente, manger au moins quatre fois par semaine du piment réduirait de 34 % le risque de mortalité par maladie cardio-vasculaire (4).
Le piment favoriserait aussi la circulation sanguine. Une étude menée sur plus de 13 000 adultes chinois pendant neuf ans a mis en évidence que leur consommation est inversement associée à l'hypertension artérielle (5). La prise de piment semble également aider à garder un poids stable (6).

... et pour le microbiote intestinal

Seuls 25 % de la capsaïcine digérée sont absorbés par l'intestin. Cet alcaloïde peut donc atteindre des concentrations élevées dans les selles, expliquant les possibles crises hémorroïdaires qui suivent une forte consommation de piment. La capsaïcine possède toutefois une action antibactérienne, en empêchant la croissance des bactéries nocives. Elle stimulerait également la production dans le côlon de mucine, laquelle favorise la croissance de « bonnes » bactéries (7).
En outre, si la consommation de piment est déconseillée aux personnes souffrant de troubles gastriques préexistants comme les ulcères, la capsaïcine inhiberait la sécrétion d'acide gastrique et aiderait à lutter contre les douleurs et pesanteurs gastriques, la dyspepsie (8).

Poivre et piments soulagent la douleur

Leurs propriétés analgésiques sont liées à la capsaïcine pour le piment et à la pipérine, un alcaloïde présent (2 à 9 %) dans l'enveloppe du grain de poivre. La douleur neuropathique diminuerait de plus de 50 % chez les individus atteints de sciatique lombaire et du syndrome du canal carpien traités pendant huit semaines avec du dexibuprofène, couplé à du Lipicur (composé d'acide lipoïque, de curcumine et de pipérine), par rapport au groupe ayant reçu l'anti-inflammatoire non stéroïdien seul ou couplé avec l'acide lipoïque (9). ■ **Sylvie Boistard**

SIBYLLE NAUD Diététicienne-nutritionniste aux Sables-d'Olonne (Vendée)

Des vertus anti-inflammatoires

« En rehaussant le goût des plats, poivres et piments permettent de limiter l'utilisation du sel en cuisine. Le piment renferme aussi de la capsaïcine et le poivre de la pipérine, deux antioxydants qui font chuter l'inflammation chronique, laquelle favorise le développement de nombreuses pathologies à composante inflammatoire comme les maladies cardio-vasculaires, l'obésité, le diabète de type 2. Le poivre intensifie également l'effet d'autres anti-inflammatoires comme la curcumine du curcuma. »

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) Piperine-A Major Principle of Black Pepper, Stojanović-Radić Z. et al, *Applied Sciences*, 2019.

(3) The association of hot red chili pepper consumption and mortality, Chopan M. et al, *PLoS One*, 2017.

(4) Chili Pepper Consumption and Mortality in Italian Adults, Bonaccio M. et al, *J. Am. Coll. Cardiol.*, 2019.

(5) Chilli intake is inversely associated with hypertension among adults, Shi et al. *Clin. Nutr. Espen*, 2018.

(6) Beneficial effects of dietary capsaicin in gastrointestinal health and disease, Xiang Y. et al, *Exp. Cell. Res.*, 2022.

(7) Dietary Capsaicin : A spicy way to improve cardio-metabolic health ? Szallasi A., *Biomolecules*, 2022.

(8) Capsaicin : A Novel approach to the treatment of fonctionnel dyspepsie, Liu T. et al, *Mol. Nutr. Food Res.*, 2023.

(9) Safety and efficacy of an add-on therapy with curcumin phytosome and piperine and/or lipoic acid in subjects with a diagnosis of peripheral neuropathy treated with dexibuprofen, Di Pierro F. et al, *J. Pain Res.*, 2013.

ILLUSTRATION OLIVIER-MARC NADEL POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Quand l'humanité a failli disparaître

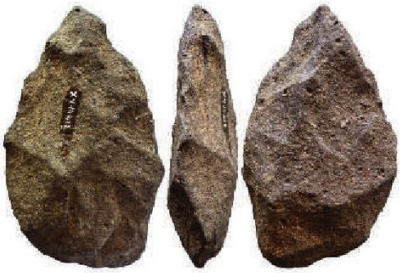
Une étonnante étude génétique montre un très fort rétrécissement de diversité dans la population dont est issue « Homo sapiens », qui se serait formé il y a environ 900 000 ans en Afrique. Comment s'explique ce goulot d'étranglement qui aurait duré plus de 100 000 ans ? Des personnes seraient-elles devenues stériles ? Cet événement pourrait aussi être lié au début d'une période glaciaire…

Par Agnès Vernet

Que s'est-il passé il y a 900 000 ans ? C'est la question que se posent tous les paléogénéticiens depuis la parution en septembre dernier d'un article montrant les traces d'un grave accident démographique dans la lignée humaine. On y parle d'un *« goulot d'étranglement »*, c'est-à-dire d'un très fort rétrécissement du nombre d'individus dans la population des ancêtres d'*Homo sapiens*. Pour les chercheurs de laboratoires chinois, italiens et américains qui ont signé cette étude dans *Science*, les ancêtres de l'espèce humaine ont frôlé l'extinction.

Il faut dresser le décor. Il y a un million d'années, *Homo sapiens* n'existe pas, pas plus que son ancêtre, qu'il s'agisse d'*Homo antecessor* ou d'*Homo heidelbergensis*, les deux prétendants au titre *(lire l'encadré p. 82)*. Mais il y a d'autres humains, *Homo erectus* ou *Homo ergaster*, probablement plusieurs espèces voire des cousins proches, comme le paranthrope *P. robustus*. On regroupe cette humanité au sens large sous le terme d'homininés. Ces espèces se sont établies sur le continent africain et même en dehors, on en a la preuve grâce à des fossiles. *« Mais il existe un hiatus dans l'enregistrement des fossiles de la période autour d'il y a 1 million d'années. On a des os d'homininés plus anciens et d'autres plus récents. Mais presque rien à cette période »*, raconte Aurélien Mounier, paléoanthropologue au CNRS. Le chercheur mène d'ailleurs une mission au Kenya pour en savoir plus sur les homininés de la transition du pléistocène moyen, il y a 1,25 million d'années à 750 000 ans. *« Nous ne savons pas à quoi ressemblaient les gens qui vivaient à cette période. Mais nous disposons de sites archéologiques. Nous avons des informations sur leurs outils — deux sites ont*

livré des bifaces — et sur la faune », précise l'archéologue. Il existe également trois fossiles (un crâne, un autre en morceaux et un pelvis) qui semblent appartenir aux hominiinés de cette époque. C'est un moment important pour la lignée humaine. Cette période débouche sur l'émergence de l'ancêtre commun des trois espèces humaines les plus connues : Neandertal, Denisova et *sapiens* (nous). Pour l'explorer, un groupe international de chercheurs s'est appuyé sur les traces génétiques qu'il a laissées dans les populations actuelles. Ils ont littéralement remonté le temps en analysant la diversité génétique héritée chez 3154 personnes modernes issues de 50 populations différentes, africaines ou non *(lire l'encadré ci-dessous)*. Claudio Quilodran, paléogénéticien à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), qui n'a pas collaboré à cette découverte, explique : *« Leur méthode s'appuie sur la théorie de la coalescence pour aller dans le passé à partir de nos données actuelles. Il s'agit d'estimer le nombre*



Bifaces découverts au Kenya sur le site de Kanyimangin, vieux d'un million d'années environ.

SOL SÁNCHEZ-DEHESA GALÁN- AURÉLIEN MOUNIERS, CNRS

de générations qui sépare deux lignées avant de trouver leur ancêtre commun. » Et le modèle le plus crédible a montré un résultat auquel ils ne s'attendaient pas : un très fort rétrécissement de diversité dans la population dont est issu *Homo sapiens*, qui se serait formé il y a environ 930 000 ans. En ne considérant que les individus qui ont transmis leurs gènes, c'est-à-dire la population effective, celle-ci serait passée en quelques années de plus de 90 000 individus à environ 1300, frôlant peut-être l'extinction. *« Nous avons trouvé ce goulot d'étranglement ancien et important il y a environ six ans,* raconte Haipeng Li, l'un des coordinateurs de l'étude, spécialiste de la génomique à l'institut Yi-Hsuan Pan pour la nutrition et la santé à Shanghai (Chine). *Au début, nous n'étions pas enthousiastes… Cela nous a semblé un peu étrange, c'était peut-être une erreur dans notre programme.* » Les chercheurs veulent alors comprendre la cause de cette « erreur ». *« Au bout de quelques mois, nous n'avions rien trouvé d'anormal. Nous avions peut-être découvert quelque chose de très intéressant.* »

« Sapiens » serait issu d'une série de métissages complexe

Ce goulot d'étranglement n'a d'abord été visible que chez les populations africaines. *« Ce n'est pas forcément étonnant car la population non africaine a perdu beaucoup de diversité lors de la sortie d'Afrique. Peu de lignages ont survécu, et c'est difficile d'explorer loin dans le passé* », précise Laurent Excoffier, professeur de génétique des populations à l'université de Berne (Suisse), qui n'a pas contribué à ces travaux. Il y a 70 000 ans environ, quelques milliers d'*Homo sapiens* quittent l'Afrique pour peupler les autres continents. Tous les descendants de non-Africains actuels sont issus de ce petit groupe, et donc d'un goulot d'étranglement secondaire qui a effacé en partie le signal de l'événement plus ancien. Les descendants d'Africains viennent de populations bien plus importantes. Leur diversité génétique ancestrale est plus grande, et y observer un goulot d'étranglement ancien est plus facile.

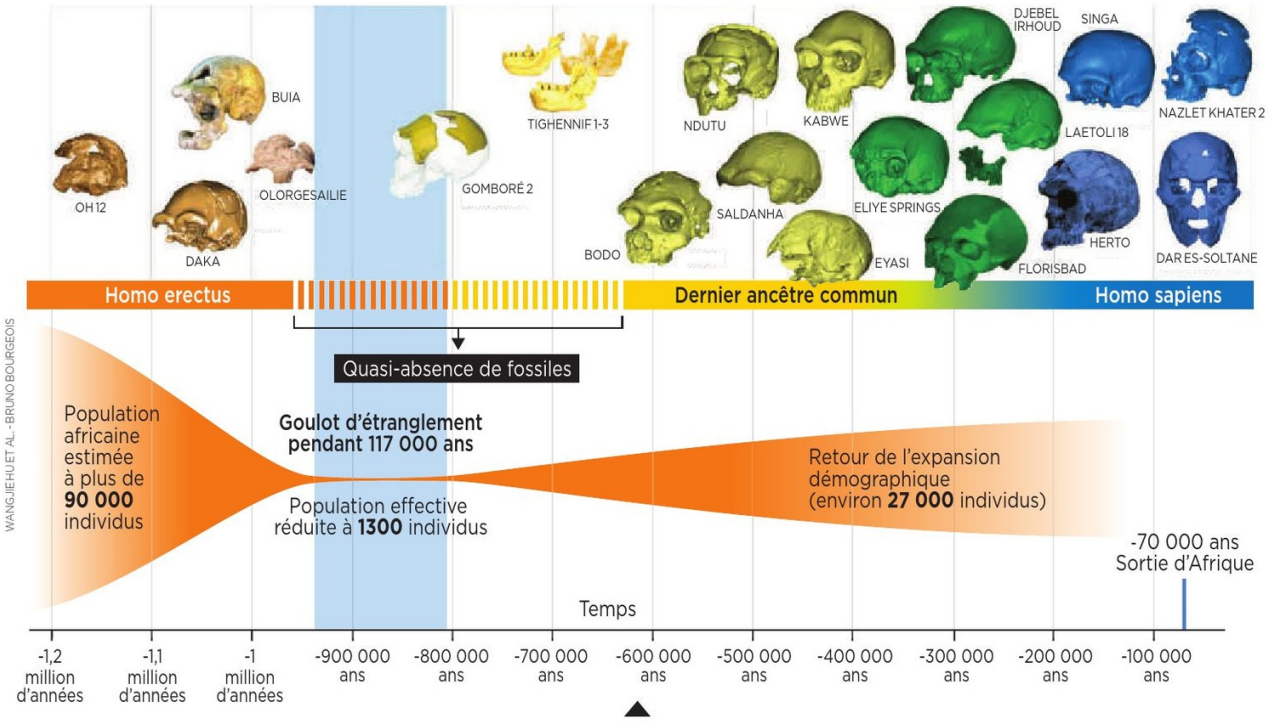
Mais l'équipe de Haipeng Li n'en est pas restée là. *« L'un des relecteurs* [un expert qui évalue l'article avant publication] *nous a demandé de repérer ce goulot d'étranglement dans les populations non africaines, dans lesquelles son signal est très faible. Nous avons suivi son conseil et nous l'avons détecté avec des estimations presque identiques* », nous

SCÉNARIOS DÉMOGRAPHIQUES

Le principe de la « coalescence »

La machine à remonter le temps qu'exploite la paléogénétique actuelle repose sur l'idée qu'on peut estimer l'ancienneté de l'ancêtre commun de deux personnes, en fonction du volume des différences génétiques entre elles. Il est très proche entre deux sœurs et de plus en plus loin si la fréquence des différences génétiques augmente. Cet aïeul constitue un événement de coalescence, c'est-à-dire un point de rencontre dans l'arbre de vie. Si on part d'une population et non plus de seulement deux personnes, on peut remonter encore plus loin, de rencontre en rencontre, d'un événement de coalescence à l'autre. Le mathématicien britannique John Kingman a mis en équations cette idée en 1980. Les paléogénéticiens modernes les ont intégrées à leurs modèles démographiques. Le modèle original présenté dans *Science* s'appelle « processus de coalescence rapide en temps infinitésimal » (en anglais FitCoal, pour Fast infinitesimal time coalescent process). Il imagine des millions de scénarios démographiques et en déduit la fréquence et la distribution de certaines mutations dans les populations actuelles. Les chercheurs peuvent ensuite choisir le plus vraisemblable. C'est comme cela qu'ils ont découvert le goulot d'étranglement ancien.

Une quasi-extinction des ancêtres d'« Homo sapiens » ?



WANG,JIEHU ET AL. - BRUNO BOURGEOIS

La théorie du « goulot d'étranglement » développée par l'étude est confortée par la quasi-absence de fossiles trouvés en Afrique entre -950 000 et -650 000 ans. C'est à l'issue de cette période qu'aurait émergé notre dernier ancêtre commun avec Neandertal.

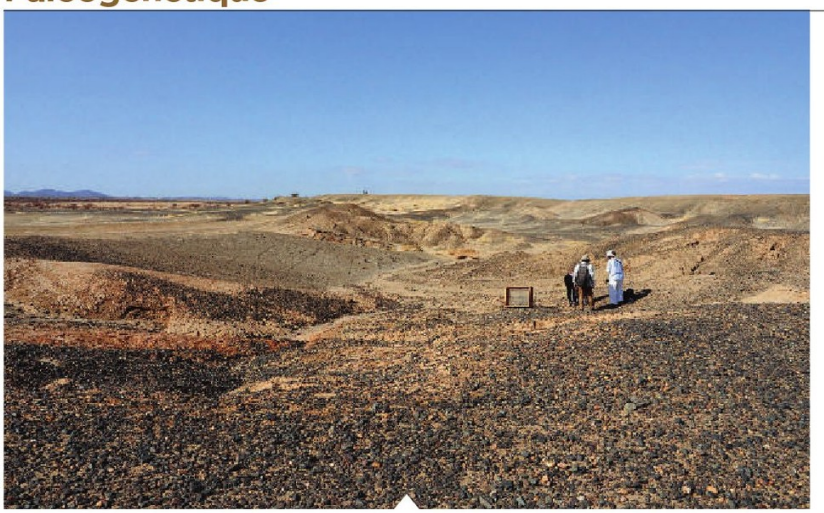
racontent-ils. Ce travail vient définitivement confirmer un phénomène que plusieurs scientifiques soupçonnaient déjà. *« Nous l'avons également trouvé vers -600 000 ans dans un récent article paru de la revue* Cell », poursuit Laurent Excoffier. Céline Bon, paléogénéticienne et anthropologue du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, abonde en ce sens : *« Un article de 2014 montrait un goulot d'étranglement similaire, cette fois à partir de données de Neandertal.* »

Ce nouvel article confirme donc que quelque chose aurait empêché une partie de la population de transmettre ses gènes à la génération suivante. Ces personnes seraient-elles devenues stériles ? Seraient-elles mortes avant d'avoir eu des enfants ? Les auteurs remarquent qu'une période glaciaire débute il y a un million d'années. *« C'est une cause possible »*, reconnaît Claudio Quilodran. Une simple hypothèse, car la coïncidence n'est jamais une causalité. Céline Bon insiste : *« Il ne faut pas croire que presque tout le monde est mort ! Une barrière écologique a pu fragmenter la population, rendre plus difficiles les échanges de gènes entre deux groupes. »*

MNHN/ VINCENT DUCARD

> « Une barrière écologique a pu fragmenter la population, rendre plus difficiles les échanges de gènes entre deux groupes »
>
> **Céline Bon,** paléogénéticienne et anthropologue du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

La chercheuse française fait référence à d'autres travaux, présentés dans *Nature* en mai dernier par des équipes canadiennes et américaines. Le généticien américain Aaron Ragsdale y montre qu'il est très vraisemblable sur le plan génétique que des groupes d'homininés pré-sapiens aient été séparés à certaines périodes, puis regroupés à d'autres. Nous serions donc issus d'une histoire de métissages plus complexe et dynamique. *« Dans son modèle, l'ancêtre de* sapiens *aurait ainsi été divisé en deux groupes et l'un des deux a traversé un grave goulot d'étranglement avant de retrouver l'autre population »*, poursuit Céline Bon. Dans ce schéma, seule une partie des ancêtres de *sapiens* aurait connu un goulot d'étranglement très important. L'autre aurait été préservée. Et cela se serait passé à peu près à la même période que l'événement détecté par Haipeng Li. *« Les choses sont probablement plus compliquées qu'une his-*



AURÉLIEN MOUNIERS, CNRS

Le site de Kanyimangin (Kenya), vieux d'un million d'années, est un des rares vestiges de cette période marquée par des bouleversements climatiques et technologiques.

toire avec une seule branche », conclut la généticienne.

Et d'après le modèle de Haipeng Li et de ses collègues, la petite population se serait maintenue pendant 117 000 ans. « *Aussi longtemps, c'est bizarre…*, s'interroge Laurent Excoffier. *Mais il ne faut pas prendre cette distribution de population au pied de la lettre, c'est une modélisation, les nombres absolus n'ont pas beaucoup de sens. En 100 000 ans, il peut se passer tellement de choses !* » Claudio Quilodran est du même avis : « *Comment une si petite population se maintient-elle pendant 117 000 ans ? Il faut des conditions climatiques très instables…* » De telles conditions devraient être observées dans les fossiles d'animaux datant de cette époque. C'est une confirmation que le généticien suggère de rechercher. « *On ne sait pas comment la taille de la population ancienne est restée si faible pendant si longtemps,* reconnaît Haipeng Li. *Cependant, nos ancêtres ont dû s'unir pour lutter contre les changements climatiques. Ils ont dû former une communauté, avec un avenir commun, celui de l'humanité.* » Au bout de 100 000 ans, ces pionniers de l'humanité ont vu la lumière au bout du goulot d'étranglement. Haipeng Li détaille : « *Une reprise rapide de la population a été détectée vers -813 000 ans. La maîtrise du feu pourrait expliquer en partie cette expansion démographique, comme le montrent les premiers vestiges archéologiques découverts en Israël, datés d'environ 790 000 ans avant notre ère. D'autres facteurs, tels que les changements climatiques, pourraient également être à l'origine de ce rétablissement rapide de la population.* » Le groupe a alors une taille effective d'environ 27 000 personnes.

Une période charnière pour la génétique de la lignée humaine

Un événement aussi traumatique a pu avoir des conséquences très importantes pour la lignée d'*Homo sapiens*. « *Un fort goulot d'étranglement produit une très forte pression évolutive. Il est possible qu'il ait conduit à un événement de spéciation* », estime Claudio Quilodran. Et, coïncidence, l'ancêtre commun à *sapiens*, Neandertal et Denisova aurait émergé durant cette transition du pléistocène moyen. Il faut savoir que tous les primates et leurs descendants possèdent 48 chromosomes, alors que nous n'en avons que 46, comme Neandertal et Denisova. Dans notre lignée, deux chromosomes ont fusionné pour donner naissance à notre chromosome 2. Cet événement a changé à jamais la génétique de la lignée humaine. Aurait-il pu définir ce dernier ancêtre commun ? C'est l'hypothèse de Haipeng Li et ses collaborateurs. Ils imaginent que cette fusion a pu résulter ou produire le goulot d'étranglement.

Car des travaux de 2022, menés à l'université de Varsovie (Pologne), estiment que la fusion ne date pas d'il y a 4,5 millions d'années environ, comme on le pensait jusqu'à présent, mais d'il y a environ 900 000 ans. Elle tomberait donc dans notre période si cruciale. « *Les dates ici sont très discutées,* tempère Céline Bon. *On sait que le chromosome 2 était fusionné chez Neandertal et Denisova. Mais cet événement peut être plus ancien… et avoir donné naissance au genre* Homo *voire à la branche des australopithèques.* » Les doutes sont encore nombreux sur ce qu'il s'est passé il y a 900 000 ans, mais on comprend que la vie de nos ancêtres a été chamboulée, peut-être même menacée. Un coup de canif dans l'image de l'humanité conquérante qu'on nous a parfois dessinée. ■

ÉVOLUTION

À la recherche du dernier ancêtre commun

Dans la famille humaine, il y a un aïeul assez spécial, un véritable fondateur de dynastie ; celui que nous avons en commun avec nos cousins Neandertal et Denisova. Qui était-il ? La génétique nous dit qu'il aurait donc surmonté une grave crise démographique et qu'il avait 46 chromosomes. Il aurait vécu il y a 1 million d'années ou 600 000 ans — rien n'est certain —, avant que Neandertal et Denisova ne prennent leurs propres chemins évolutifs il y a plus de 400 000 ans. Il aurait peut-être exploré l'Europe. D'ailleurs, la paléoanthropologie hésite à lui attribuer les fossiles d'*Homo antecessor*, découverts en Espagne, ou d'*Homo heidelbergensis*, en Allemagne. Certains pensent plutôt qu'on n'a pas encore trouvé ses ossements. Bref, on ne sait pas grand-chose de lui avec certitude, sauf qu'il a été crucial dans notre histoire.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE

Inquiet de la puissance de l'ordre du Temple, le roi Philippe le Bel fera condamner nombre de ses membres au bûcher.

Ce rouleau qui innocente les templiers

Les Archives nationales à Paris exposent un parchemin détaillant les interrogatoires des membres de l'ordre du Temple accusés d'hérésie. Un document qui éclaire d'un jour nouveau la rivalité entre le roi Philippe le Bel et le pape Clément V.

C'est une terrible page de l'histoire de France et du christianisme qui est actuellement dévoilée aux Archives nationales, et ce jusqu'au 15 janvier 2024. Le mot « page » est peut-être un peu faible, puisque le document au centre de cette exposition est un rouleau de parchemin long de 22 mètres, dont les feuillets en peau de chèvre, cousus les uns avec les autres, sont marqués à chaque ligature de quatre complexes signatures de notaires destinées à garantir le fait qu'aucune modification ultérieure n'y a été effectuée. À sa surface, en latin, a été consigné dans les moindres détails l'interrogatoire des templiers mené entre le 19 octobre et le 24 novembre 1307 dans la salle basse du Temple, à Paris, sur ordre du roi Philippe le Bel. Le texte n'est pas la transcription intégrale des propos recueillis sur le vif au moment des interrogatoires, mais celle des minutes reformulées, de façon plus concise, par les officiers du roi. Des confessions arrachées sous la torture aux officiers de l'Ordre, les *milite templi*, par l'inquisiteur de France Guillaume de Paris. L'épisode, d'une violence inouïe, débouchera au printemps 1312 sur la disparition pure et simple de l'ordre du Temple et, en mars 1314, sur la mort tragique sur le bûcher de son dernier grand maître, Jacques de Molay, sept ans après son arrestation. Mais comment cet ordre religieux et militaire, qui entretenait depuis plus de deux cents ans de bonnes relations avec les souverains d'Europe — au point de garder le trésor de certains d'entre

eux —, a-t-il pu être accusé d'hérésie par le roi de France et « lâché » par le pape Clément V ?
Il faut bien comprendre ce qu'étaient les templiers pour cerner les raisons du sabotage de cette confrérie devenue trop encombrante. Fondé par Hugues de Payns sous l'impulsion de l'abbé Bernard de Clairvaux en 1127, l'ordre du Temple est le premier et le plus éminent ordre militaire et religieux de la chrétienté d'Occident. Il était formé de chevaliers laïcs, pour la plupart français (même si l'on compte des frères d'armes venus d'Angleterre, d'Allemagne, d'Espagne ou d'Italie). Sa mission initiale était d'escorter les pèlerins chrétiens jusqu'en Terre sainte, au Proche-Orient, sous domination chrétienne depuis la prise de Jérusalem en 1099. Sur place, la confrérie protégeait également les lieux saints, comme le Golgotha ou le mont des Oliviers. « *Plus de deux cents ans après sa fondation, et malgré des rumeurs de déclin, l'ordre du Temple était encore extrêmement puissant au début du XIVe siècle,* explique Philippe Josserand, maître de conférences en histoire médiévale à l'université de Nantes et spécialiste de l'histoire des ordres religieux-militaires du Moyen Âge. *Au service de Dieu, il ne dépendait que du seul pape.* » Et c'est bien là ce qui va le perdre : Philippe le Bel ne supporte plus les interférences d'un souverain pontife qui souhaite étendre son autorité sur l'ensemble de l'Europe. Aussi le roi de France est-il déterminé à montrer, en s'attaquant à l'ordre, qu'il peut frapper où il le veut et s'affirmer à son tour souverain en son royaume. « *Les malheureux templiers se retrouvent en réalité pris en étau entre les deux ennemis les plus puissants du moment* », poursuit Philippe Josserand. Bien entendu, le roi n'est pas dupe de l'illégalité et de l'irrationalité de sa manœuvre lorsqu'il se décide à arrêter les templiers pour hérésie. « *Il sait très bien que l'ordre n'a rien à se reprocher, mais pour gagner son bras de fer, il lui faut aller le plus loin possible.* »

CHRISTIAN CHAUVET/CC

« Le roi sait très bien que l'ordre n'a rien à se reprocher, mais pour gagner son bras de fer avec le pape, il lui faut aller le plus loin possible »

Philippe Josserand, maître de conférences en histoire médiévale à l'université de Nantes

Un vaste « coup de filet » a lieu le vendredi 13 octobre au matin

Dès le printemps 1307 sont organisées dans le plus grand secret des réunions entre Philippe le Bel et ses conseillers pour préparer cette arrestation d'ampleur. De son côté, le garde du sceau Guillaume de Nogaret monte un dossier d'accusation à partir d'informations recueillies auprès de templiers renégats. Le déclenchement de ce vaste « coup de filet » est finalement donné au petit matin du 13 octobre 1307. Plusieurs centaines de templiers — « *peut-être un millier* », selon Philippe Josserand — sont arrêtés par surprise aux quatre coins du royaume et se voient dépossédés de leurs biens. Tous sont immédiatement isolés les uns des autres et soumis à divers supplices dans le but d'accélérer leur passage aux aveux sur les « crimes » qu'ils auraient commis. On les accuse d'avoir adoré un chat et une idole, un homme au visage barbu qui pourrait avoir été inspiré d'une relique inconnue en Occident à cette époque, le suaire du Turin. Mais aussi de s'être adonnés à diverses

CONSERVATION

Un rouleau en soins intensifs

Conservé durant cinq siècles dans la sacristie de la Sainte-Chapelle (Paris) avec les archives du roi avant son transfert aux Archives nationales à la Révolution, le rouleau d'interrogatoire de 138 membres parisiens de l'ordre du Temple a été contraint de partir en « soins intensifs » en 2010. « *Ses premiers feuillets, surtout, manipulés au fil du temps, étaient très endommagés* », confie Jean-François Moufflet, responsable du fonds des archives de la royauté au département du Moyen Âge et de l'Ancien Régime des Archives nationales. Ses déchirures ont ainsi été pansées, ses manques comblés et sa surface nettoyée avec une petite gomme de latex pour lui redonner un aspect clair, plus proche de sa teinte d'origine. « *Une fois la poussière accumulée au fil des siècles ôtée, le parchemin a été placé dans une chambre d'humidification pour effacer ses plis et le retendre.* » Aujourd'hui déroulé sous sa vitrine, le précieux document paraît avoir été rédigé hier. Mais ces quatre mois d'exposition à la lumière devront être compensés par une obscurité totale durant les prochaines années, au risque qu'il ne s'altère à nouveau. Il réintégrera donc sa boîte de protection faite sur mesure, elle-même conservée dans un meuble hermétique dont la température et le taux d'humidité sont constamment contrôlés, sans autorisation de sortie !

ARCHIVES NATIONALES DE FRANCE

Daté de 1307, le parchemin, long de 22 mètres, consigne les « aveux » obtenus sous la torture de 138 templiers, dont ceux de Jacques de Molay, le grand maître de l'ordre.

pratiques hérétiques lors de leur rite d'intronisation dans l'ordre : d'avoir craché sur la Croix, reçu *« un baiser sur la bouche, sur le nombril, ou sur le ventre nu, ou sur l'épine dorsale, ou sur la verge »* selon le rouleau. Ou encore d'avoir pratiqué la sodomie, une des fautes les plus graves au Moyen Âge. *« Parce que les tortures sont immédiates et pratiquées sans relâche, de très nombreux frères avouent de tels actes »*, affirme Philippe Josserand. Y compris le grand maître de l'ordre, Jacques de Molay, dont les aveux succincts figurent dans le rouleau et sont visibles sur les 3 mètres de parchemin déroulés aux Archives : *« Il dit aussi sous serment qu'après avoir fait plusieurs promesses relatives aux observances et aux statuts de l'ordre, ils lui mirent le manteau au cou. Puis celui qui le recevait fit apporter devant lui une croix de bronze sur laquelle était représenté le crucifix ; il lui dit et lui ordonna de renier le Christ dont c'était l'image. Ce qu'il fit, bien malgré lui. Et alors celui qui le recevait lui ordonna de cracher sur la croix, mais il cracha par terre. Interrogé sur le nombre de fois qu'il le fit, il dit sous serment qu'il ne cracha qu'une fois : de ce fait, il s'en souvient bien. Interrogé sur le point de savoir si, lorsqu'il fit vœu de chasteté, on lui a dit qu'il pouvait s'unir charnellement avec ses frères, il dit sous serment que non et qu'il ne le fit jamais. »*

En novembre 1310, pour tenter de reprendre la main, le pape décide d'instruire sa propre enquête tout en incitant les templiers à défendre leur ordre. Plusieurs centaines d'entre eux vont alors revenir sur leurs dépositions faites trois ans plus tôt sous la torture, un crime absolu équivalent à un nouveau plongeon dans l'hérésie. *« Les templiers qui reviennent sur leurs déclarations savent qu'ils s'exposent à la peine de mort. »* Philippe le Bel, déterminé à ne laisser aucune riposte s'organiser, s'empresse d'allumer un grand bûcher à Paris. Le 12 mai 1310, 54 chevaliers « relaps » du Temple y périssent. Ceux qui n'ont pas modifié leur témoignage et échappent à la mort, eux, ne retrouvent que rarement leur liberté. Jacques de Molay et le précepteur de Normandie Geoffroy de Charnay seront les deux derniers templiers à être brûlés vifs, le 18 mars 1314, après une longue attente en détention.

Le rouleau a permis une relecture de l'histoire

Si l'éradication de l'ordre fut d'une efficacité redoutable, il reste un point sur lequel Philippe le Bel ne remporta pas la victoire : il ne parvint jamais à le faire condamner. *« Clément V n'a certes pas réussi à protéger ses hommes, mais il a su éviter à l'ordre du Temple lui-même la condamnation pour hérésie,* explique Philippe Josserand. *Avec le peu de marge de manœuvre qu'il avait, il a finalement bien joué. »* Une vision des choses nouvelle que des documents comme le rouleau ont permis d'acquérir. *« Depuis la traduction du document par Jules Michelet en 1851, une surprenante déférence à l'égard de Philippe le Bel persistait. Il y a quelques années, on s'interrogeait encore sur la culpabilité des templiers ! Plus que tout autre source, le rouleau nous a incités à nous poser des questions et à reconsidérer la lecture d'un document administratif destiné à imposer une "religion royale" française. »* Sept siècles auront donc été nécessaires pour que l'innocence des templiers soit reconnue. ■

Marine Benoit

CADEAUX HIGH TECH SPÉCIAL NOËL

Se simplifier la vie !

Finie l'ère compliquée des solutions ultra-technologiques difficiles à prendre en main, bienvenue dans le monde de la technologie douce. Toujours plus efficaces et plus simples à utiliser, les objets numériques nous facilitent la vie au quotidien. Objectif de ces appareils à tout faire : alléger notre charge mentale et nous libérer de la pression. Grâce à eux, plus question de noter son poids en montant sur la balance, de se tracasser pour se faire un cappuccino ou de s'inquiéter pour ses proches : on reste connecté mais serein, partout où l'on se trouve, à la maison comme en voyage. À l'approche des fêtes de fin d'année, voici une sélection de cadeaux numériques qui nous apportent confort et sérénité.

DOSSIER COORDONNÉ PAR Caroline Brun, Agence Forum News
RÉDACTION : William Coop-Phane

Sécurité renforcée

▶ En plus d'afficher de nombreuses mesures de santé (fréquence cardiaque, température de la peau, saturation en oxygène (SpO_2), niveau de stress, suivi du sommeil…) et de vous motiver dans vos activités physiques, cette montre connectée dotée d'une autonomie de 24 heures propose des fonctions de sécurité personnelle : le SOS d'urgence, la détection de chutes et le tout nouveau Safety Check. Celui-ci utilise le minuteur pour indiquer à vos proches que vous êtes rentré chez vous en toute sécurité, que ce soit après une randonnée en solo ou une soirée en ville. Si vous n'avez pas atteint votre destination à la fin du compte à rebours, la montre enverra un signal d'urgence et votre position GPS aux contacts que vous avez choisis.

Google Pixel Watch 2. Prix à partir de **399 €**

Valise de divertissement

▶ À mi-chemin entre une mini-télé et une maxi-tablette, cet écran Full HD de 27 pouces est logé dans une mallette de transport robuste, certifiée à la norme militaire américaine MIL-STD 810H. Équipé de quatre haut-parleurs Dolby Atmos et d'une batterie avec une autonomie de 3 heures, l'écran peut être utilisé en mode portrait pour afficher vos réseaux ou le contenu de votre mobile, en mode paysage pour profiter des plateformes de streaming, ou encore basculé en mode table pour jouer une partie d'échecs.

LG Stanbyme Go. Prix indicatif : **1000 €**

Robot autonome

▶ Maintenance minimale pour cet aspirateur robot bardé de capteurs qui ne se contente pas de nettoyer tapis et moquettes, mais passe aussi la serpillière grâce à ses deux patins rotatifs rétractables qui peuvent atteindre une vitesse de 180 tours par minute. Lorsqu'il a terminé, il se gare à sa station multifonction où il vide lui-même le collecteur, lave et sèche les serpillières pour éviter les mauvaises odeurs et remplit le réservoir d'eau (2,5 litres) avant de se recharger (autonomie de 120 minutes) pour être prêt à une nouvelle intervention programmable dans une application dédiée.

Xiaomi Robot aspirateur x 10 +. Prix indicatif : **899,99 €**

Repassage sans stress

▶ À la fois planche de repassage multi-angles, centrale vapeur et défroisseur ultrapuissant, cette solution tout-en-un est censée redonner fière allure à vos vêtements tout en éliminant 99,9 % des bactéries présentes sur les tissus et en les débarrassant de toute trace d'odeur. Grâce à sa base amovible, elle peut également être utilisée pour assainir les rideaux, les canapés ou d'autres tissus d'ameublement en mode vapeur. En mode repassage, pas de thermostat à régler, la température du fer s'adapte automatiquement au textile, sans risque de brûler les vêtements.

Philips All-in-One Serie 8500.
Prix indicatif : **449 €**

REVIVEZ SOUS TOUS LES ANGLES L'INTÉGRALITÉ DE

LA PREMIÈRE MISSION SPATIALE DE THOMAS PESQUET

"DES IMAGES
À COUPER LE SOUFFLE"
FRANCE INFO

THOMAS PESQUET

L'INTÉGRALE DE LA MISSION PROXIMA

AVEC LES 4 FILMS :
16 LEVERS DE SOLEIL - THOMAS PESQUET, L'ÉTOFFE D'UN HÉROS
THOMAS PESQUET, L'ENVOYÉ SPATIAL - DANS LES YEUX DE THOMAS PESQUET

DISPONIBLE EN ÉDITION COLLECTOR SUR
WWW.25EHEURE.COM
ET DANS LES POINTS DE VENTE HABITUELS

LA VINGT-CINQUIÈME HEURE
DISTRIBUTION

COFFRETS DVD ET BLURAY

4 films + Bonus

COFFRET COMBO DVD +BLURAY

4 films en DVD et BLURAY + Bonus
+ 1 CD audio de la BO du film

COFFRET COLLECTOR EDITION DELUXE

4 films + 1 CD audio de la BO du film + 1 cardboard VR + 3 carte postales collector
+ La réplique de la figurine du Petit Prince que Thomas a emportée avec lui dans l'ISS

CHAQUE COFFRET CONTIENT UN ACCÈS UNIQUE POUR DÉCOUVRIR L'EXPÉRIENCE ***DANS LA PEAU DE THOMAS PESQUET***,

LE PREMIER FILM EN RÉALITÉ VIRTUELLE TOURNÉ DANS L'ESPACE

Enceinte endurante

▶ Difficile de résister à la dernière-née de la galaxie Sonos, une enceinte stéréo compatible AirPlay 2 qui se connecte à la fois en Wi-Fi multiroom et en Bluetooth. Lorsque vous êtes hors de portée d'un réseau Wi-Fi, elle peut basculer en mode Bluetooth grâce à un bouton dédié et pilotée directement depuis votre application de streaming habituelle. Ultra-endurante avec une autonomie de 24 heures, elle bénéficie du système de calibration qui ajuste et optimise la qualité sonore en fonction de l'environnement, aussi performante dans le salon que dans le jardin, et peut être contrôlée par la voix (Sonos Voice Control et Amazon Alexa).

Sonos Move 2. Prix indicatif : **499 €**

Balance pudique

▶ Grâce au signal électrique multifréquence qu'elle envoie à votre corps, cette balance connectée en Wi-Fi et Bluetooth analyse avec précision votre composition corporelle. Masse grasse, masse musculaire, indice de graisse viscérale, fréquence cardiaque, âge métabolique… le tout complété par des informations sur la qualité de l'air et la météo. En quelques secondes, le tour est joué et les données sont consignées dans l'application. Pour ceux qui préfèrent ne pas être confrontés à des chiffres et des statistiques à chaque pesée, un mode « yeux fermés » permet d'enregistrer les valeurs directement dans l'application, sans les afficher à l'écran. À la place, c'est un défilé de smileys et de dessins joyeux.

Withings Body Smart. Prix indicatif : **99,95 €**

Casque anti-nuisances

▶ L'arrivée de Dyson sur le marché de l'audio ne pouvait pas passer inaperçue avec ce casque d'une efficacité redoutable, doté d'une autonomie de 50 heures et équipé de 11 microphones, dont huit dédiés uniquement à la réduction de bruit. La surprise vient de sa visière amovible qui projette de l'air purifié vers le nez et la bouche de l'utilisateur lors des déplacements urbains. Pour y parvenir, des compresseurs logés dans chaque écouteur aspirent l'air à travers des filtres qui capturent 99 % des particules polluantes de 0,1 micromètre de diamètre et traquent les gaz acides associés à la pollution urbaine (dioxyde d'azote, NO_2) et dioxyde de soufre, SO_2).

Dyson Zone. Prix indicatif : **899 €**

Bulle sonore

▶ Dotés d'un système de réduction du bruit très performant qui s'adapte aux conditions environnantes, ces écouteurs premium se font oublier grâce à leur design léger et semi-ouvert qui soulage la pression sur l'oreille. Avec leurs haut-parleurs de 10 mm, ils offrent un son riche, clair et équilibré et une autonomie confortable de 6 heures (27 heures avec l'étui). Compatibles avec la technologie audio spatiale de Dolby (Atmos et Head tracking), ils créent une expérience sonore immersive qui maintient l'auditeur au cœur de la scène sonore, même lorsqu'il tourne la tête, comme lors d'un concert ou au cinéma.

Jabra Elite 10. Prix indicatif : **249 €**

Du grain à la tasse

▶ Temps de chauffe éclair (3 secondes) pour cette machine à expresso en acier inoxydable équipée d'un broyeur de précision et d'un écran tactile qui vous guide à chaque étape de la préparation, depuis le dosage des grains jusqu'à l'extraction, en passant par la taille de la mouture et le tassage. Les adeptes de cappuccino, de latte macchiato ou de flat white bénéficient d'une fonction astucieuse qui calibre automatiquement la température, la pression de l'eau et de la vapeur en fonction du lait utilisé (vache, avoine, soja ou amande). Résultat : un café et une micro-mousse soyeuse digne d'un coffee shop.

Sage Barista Touch Impress. Prix indicatif : **1299,90 €**

Double écran

▶ Avec son design élégant et ses finitions soignées (châssis en aluminium, charnière robuste, dos en verre poli…), ce smartphone pliant à clapet se distingue d'emblée par son écran externe de 3,6 pouces. Un format XXL qui occupe la quasi-totalité de la surface, ce qui permet de répondre à des messages, consulter des cartes Google ou profiter des réseaux sociaux sans avoir à déplier l'écran principal de 6,9 pouces. Lorsque vous passez le doigt sur ce dernier, les applications reprennent là où elles s'étaient arrêtées, de manière très fluide. Le smartphone dispose de 2 modules photo (12 MP et 13 MP grand angle), de 8 Go de RAM et de 256 Go d'espace de stockage, ainsi que d'une charge rapide de 30 W, de quoi assurer une recharge complète en 1 heure et 10 minutes.

Motorola Razr 40 Ultra. Prix indicatif : **1199 €**

LA CITÉ DE LA MER

CHERBOURG

UNE ÉMOTION VIVANTE DEPUIS 2002

leCotentin
COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

CITEDELAMER.COM

ÅSGARD | www.asgard-media.fr

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Le ciel du mois p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Solutions des jeux p. 97
▶ Jeux p. 98

PETE WEST - FTO

Des prélèvements sont effectués dans le lagon de l'île Ducie (Pacifique) lors de la mission 2016-2018.

« Tara » fait battre le cœur des océans

Cet ouvrage retrace, en mots et en images, 12 expéditions de la goélette à la découverte des merveilles du monde océanique.

EXPLORATION Au début, il ne s'agissait « que » d'une mission de sensibilisation du grand public à l'océan. Aujourd'hui, *Tara* est devenue une pièce maîtresse dans l'arsenal d'outils dont disposent les scientifiques pour l'étudier. Étonnant destin de cette goélette, voulue par l'explorateur Jean-Louis Étienne pour accomplir une dérive arctique, qui connut des jours funestes lorsque l'explorateur Peter Blake y fut assassiné, et qui s'est imposée depuis vingt ans comme un moyen d'exploration unique pour les scientifiques et comme un lieu de création pour des artistes qui ont toujours une cabine à bord.

Depuis la première mission en 2004 au Groenland, ceux qu'on appelle désormais les « Taranautes » ont étudié les récifs coralliens du Pacifique, le plancton, la pollution en Méditerranée, le plastique déversé par les fleuves européens… Des dizaines de milliers d'échantillons qui nourrissent des centaines de publications scientifiques. Mais surtout, 12 voyages de rêve qui sont racontés par l'écrivain Stéphane Dugast et la journaliste de *Sciences et Avenir*, Sylvie Rouat, dans ce livre magnifiquement illustré. ■

Mathieu Nowak

Tara. Histoire d'un engagement pour l'océan, Stéphane Dugast et Sylvie Rouat, Paulsen, 204 p., 32 €

L'art de la cartographie

REGARDS Selon leur créateur, les connaissances de l'époque et les techniques utilisées pour les réaliser, les cartes géographiques jettent chacune un regard particulier sur le monde. Cet ouvrage réunit 20 cartes

étonnantes, réalisées du XVI^e^ siècle à 2023, dans une démarche scientifique ou artistique. Un double regard qui anime cet ouvrage surprenant. ■ **S. R.**

Les 20 plus belles cartes du monde, collectif, Autrement, 44 p., 24,90 €

Tout comprendre du continent blanc

ATLAS Découvert il y a seulement deux siècles, l'Antarctique est la dernière terre vierge de transformations humaines. Mais le changement climatique qui l'affecte pose la question de l'exploitation future de ses ressources. Cet atlas fait le point en cartes sur toutes les connaissances scientifiques acquises sur ce continent glacé : courants marins, faune, glaciers, bases polaires. L'auteur est l'un des pionniers de l'utilisation de l'imagerie

satellitaire pour le suivi de la faune, ce qui lui a permis de découvrir près de la moitié des colonies de manchots empereurs du monde. ■ **S. R.**

Atlas de l'Antarctique, Peter Fretwell, Armand Colin, 220 p., 35 €

Secrète baleine

REPRÉSENTATIONS Conjuguez le talent d'un grand érudit à une fabuleuse richesse iconographique, et vous obtiendrez un livre qui mérite le détour.

Michel Pastoureau nous embarque dans l'histoire de l'imaginaire autour de la baleine. Autrefois monstre dévoreur des abysses, puis victime d'une chasse industrielle, elle est aujourd'hui une créature protégée. Gravé sur de l'ivoire préhistorique, présent dans les enluminures médiévales, jusqu'à une gouache de Jackson Pollock, le cétacé marque durablement notre histoire. ■ **A. De B.**

La Baleine, une histoire culturelle, Michel Pastoureau, Seuil, 160 p., 19,90 €

Capturer l'invisible

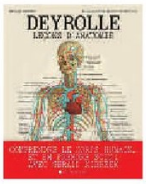
ÉTRANGETÉS À travers plus de 120 documents rares ou inédits, cet ouvrage interroge la fascination des savants pour les phénomènes dits inexpliqués des années 1890 à nos jours. Ectoplasmes, spiritisme photographies d'auras… défilent comme autant de tentatives de capturer l'invisible, ou du moins ce qui ne peut être saisi par la science.

L'ouvrage n'est autre que le catalogue de l'exposition « Phénomènes inexpliqués », qui se tient jusqu'au 17 février 2024 au musée d'Histoire de la médecine, à Paris. ■ **M. B.**

Phénomènes inexpliqués, sous la dir. de Philippe Baudouin et Maryline Desaintjean, Delpire & Co, 208 p., 39 €

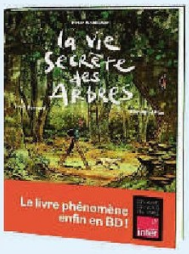
Le corps décortiqué

ANATOMIE Combien d'élèves, depuis plus de 150 ans, auront-ils appris les secrets de l'anatomie grâce aux célèbres planches Deyrolle ? Cet ouvrage rassemble la totalité des originaux, aux couleurs et aux traits incomparables. Le médecin Gérald Kierzek commente et met en perspective à la lumière des évolutions des connaissances le caractère didactique des planches, dont la qualité descriptive est très largement accessible aux curieux. Qui glaneront au passage quelques conseils pour prendre soin de leur corps. ■ **A. De B.**



Deyrolle, leçons d'anatomie, Gérald Kierzek, Albin Michel, 240 p., 49 €

Une déclaration d'amour à la forêt

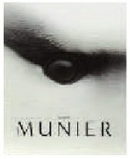


BD Vous avez aimé le livre ? Vous adorerez la bande dessinée ! Ou elle vous offrira enfin l'occasion de découvrir l'univers fascinant des arbres à travers l'histoire d'un forestier devenu célèbre grâce à son talent de vulgarisateur, Peter Wohlleben. La déclinaison illustrée de son best-seller met en scène ce fou des forêts dans un parcours d'observations et d'études pointu, qui fera progressivement basculer son regard, de celui de gestionnaire de la ressource bois à celui de fin connaisseur d'un milieu foisonnant de complexité et d'interactions. Les saisons se succèdent dans un scénario qui mêle la biographie du personnage aux découvertes du fonctionnement intime de l'arbre, de la cime aux radicelles, de l'efficacité de la photosynthèse aux secrets de la communication souterraine grâce aux réseaux de mycélium, qui relient les arbres entre eux. Les dessins à l'encre et à l'aquarelle, détaillés et subtils, nourris par un regard curieux, racontent une déclaration d'amour à la forêt. ■ **Andreina De Bei**

La Vie secrète des arbres, Fred Bernard, Peter Wohlleben, Benjamin Flao, éditions Les Arènes, 240 p., 29,90 €

Un regard singulier sur la nature

PHOTOGRAPHIE Ses mots sont rares, ses photos résonnent d'une intense vibration : celle du lien avec la nature. Vincent Munier marque les 35 ans de ses rencontres avec le sauvage par un magnifique recueil d'images captées d'un bout à l'autre de la planète : un ballet de grues du Japon, le regard perçant d'un loup, l'apparition d'une panthère des neiges… Toutes pourraient se résumer à l'émotion éprouvée à ses 12 ans, lors d'un premier affût et la vision d'un chevreuil : *« Face à moi, la grâce incarnée ! »*. Offerte à nos regards dans ce livre précieux. ■ **A. De B.**



Vincent Munier, la monographie, Kobalann, 384 p., 85 €

SÉLECTION ENFANTS

Objectif Lune

BD Quel enfant n'a jamais rêvé d'assister en direct aux premiers pas de l'humain sur la Lune ? Cette bande dessinée, accessible dès 7 ans, est une manière détournée d'exaucer ce souhait. Très immersive et pleine d'humour, elle invite à vivre l'événement à travers les yeux de trois enfants, qui campent en face de cap Kennedy (États-Unis) avec leur famille en juillet 1969 et ne manquent rien de l'exploit des héros de la mission Apollo 11. ■ **L. L.**

Premiers pas sur la Lune, Félix Elvis, Stéphane Douay, Milan, 56 p., 12,90 €

Le requin à travers les âges

PORTRAITS Cet album illustré retrace la grande épopée des requins depuis leur apparition il y a 450 millions d'années. Ils ont ainsi survécu aux grandes extinctions grâce à une capacité d'adaptation exceptionnelle et quelques atouts physiologiques, décrits ici de manière didactique. Parmi cette succession de portraits d'espèces remarquables, citons le *Cladoselache*, l'un des tout premiers requins, qui avalait ses proies par la queue ! À partir de 9 ans. ■ **S. R.**

Requins, une histoire mordante, Miriam Forster et Gordy Wright, Delachaux et Niestlé, 80 p., 19,90 €

EXPOSITIONS

Auxerre (89)

Anatomie comparée des espèces imaginaires
Des créatures fictives, issues de légendes ou de la culture populaire (la Vouivre, Chewbacca, Totoro…) comme prétexte pour aborder la discipline de l'anatomie comparée. Chacune est étudiée de manière scientifique.
Muséum, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 17 mars 2024. Rens. : 03.86.72.96.40.

Lyon (69)

Musée d'Histoire de Lyon
Dans le cadre du renouvellement du parcours du musée, un quatrième espace ouvre le 2 décembre, consacré à l'organisation du pouvoir, aux crises et aux engagements militants dans la ville.
Gadagne, musée d'Histoire de Lyon, 1 place du Petit-Collège. Rens. : 04.78.42.03.61.

Jean Moulin, les voies de la liberté
La vie de Jean Moulin, de son enfance à son arrestation par la Gestapo en 1943, au travers de témoignages, peintures, dessins, correspondance…
Centre d'histoire de la Résistance et de la déportation, 14, avenue Berthelot, jusqu'au 26 mai 2024. Rens. : 04.72.73.99.02.

Marseille (13)

Une autre histoire du monde
L'histoire du monde du XIIIe au XXIe siècle est retracée en 150 œuvres, textiles, cartes, objets archéologiques ou manuscrits, mais depuis un point de vue non européen.
Mucem, 1, esplanade J4, jusqu'au 11 mars 2024. Rens. : 04.84.35.13.13.

Paris (75)

Préhistomania
Des peintures sur toile ou sur papier reproduisent des œuvres rupestres. Elles ont été réalisées dans le cadre d'expéditions scientifiques en Algérie, au Tchad, en Libye et en Espagne.
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 20 mai 2024. Rens. : 01.44.05.72.72.

Explorer l'infiniment…
Les 120 objets de ce parcours ont pour thème le défi scientifique aux limites de l'inaccessible. Il est question des abysses, des Pôles, de météorite martienne ou de l'exploration de la matière.
Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 12 mai 2024. Rens. : 01.53.01.82.63.

Souchez (62)

Jeux de guerre
La scénographie s'inspire des salles de jeux d'arcade pour étudier la place de la Première Guerre mondiale dans les jeux vidéo de guerre. Avec des objets et des commentaires d'historiens.
Centre d'histoire du Mémorial'14-18 Notre-Dame-de-Lorette, 102, rue Pasteur, jusqu'au 19 mai 2024. Rens. : 03.21.74.83.15.

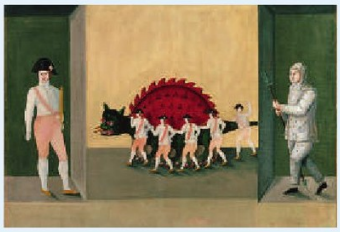
Toulouse (31)

Sex-appeal, la scandaleuse vie de la nature
Plantes ou animaux, c'est la sexualité du vivant qui est à l'honneur dans cette exposition. Il n'est pas seulement question d'évolution et de reproduction, mais aussi d'érotisme, de séduction et de sensualité.
Muséum, 35, allées Jules-Guesde, jusqu'au 7 juillet 2024. Rens. : 05.67.73.84.84.

Villeneuve d'Ascq (59)

Léonard de Vinci à la croisée des arts et des sciences
Conçue par le château du Clos-Lucé, l'exposition montre l'étendue des talents de Léonard de Vinci, peintre, architecte, urbaniste ou ingénieur. Reproductions d'œuvres et carnets de notes à l'appui.
Lire notre reportage : sciav.fr/922vinci
Forum départemental des sciences, 1 place de l'Hôtel-de-Ville, jusqu'au 25 août 2024. Rens. : 03.59.73.96.00.

« Tarasque et les tarasquaires », de Claude Michel Celse, vers 1850 (ci-dessous), **« Roping »,** de Will Cotton, 2019 (à droite).



RMN-GRAND PALAIS (MUCEM) - WILL COTTON © ADAGP, PARIS 2023

Lens (62) / Exposition

Animaux fantastiques

Dragons, griffons, sphinx, phénix ou encore licornes… Toutes les époques semblent avoir leurs créatures nées des turpitudes de l'âme humaine. Même au paléolithique supérieur (entre 450 000 et 120 000 avant notre ère), il existe des images d'animaux imaginaires dans des grottes ornées. Ces animaux fantastiques, le Louvre-Lens leur consacre une exposition riche de 250 œuvres (peintures, sculptures, objets d'art, littérature, cinéma, musique…). Avec deux questions comme fil conducteur : que sont ces créatures? Que disent-elles de nous? Le visiteur croise la figurine de Pazuzu, démon mésopotamien, et les dragons ont droit à leur propre salle tant ils sont foisonnants dans l'histoire de l'art. Ils conduisent aussi vers un tout autre chapitre : celui de la fantasy, genre artistique et littéraire qui explosa au XXe siècle sous la plume d'auteurs comme J. R. R. Tolkien ou Winsor McCay. Lire notre reportage : sciav.fr/922fantastic ■ **Marine Benoit**

Louvre-Lens, 99, rue Paul-Bert, jusqu'au 15 janvier 2024. Rens. : 03.21.18.62.62.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

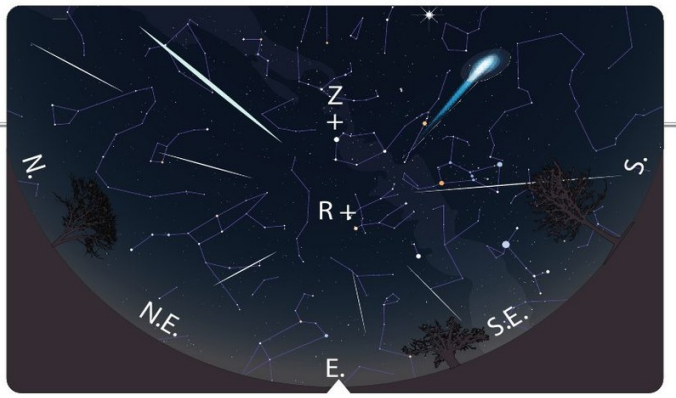
MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (21°) à l'est du Soleil le 4 et passe en conjonction inférieure le 22. Elle est à peine observable sous nos latitudes.

VÉNUS L'étoile du Berger brille intensément au-dessus de l'horizon sud-est en fin de nuit et au petit matin. Toutefois, l'abaissement progressif de l'écliptique sur l'horizon le matin et son rapprochement quotidien au Soleil (en direction) dégradent quelque peu sa visibilité au cours du mois.

MARS La planète Rouge n'est pas visible ce mois, trop proche de la direction du Soleil.

JUPITER Quelques semaines après son passage à l'opposition, la plus grosse des planètes se trouve toujours dans de bonnes conditions d'observation. Très brillante, elle est le premier astre ponctuel à « s'allumer » dans le ciel au déclin du jour. Elle culmine plein sud en soirée, à une bonne cinquantaine de degrés de hauteur.

SATURNE La planète aux anneaux est observable en soirée et en première partie de nuit. Moyennement brillante, elle ne devient visible qu'après sa culmination, alors qu'elle entame sa descente vers l'horizon ouest.



Aspect du ciel le soir du 14, vers minuit. Z est le zénith et R le radiant.

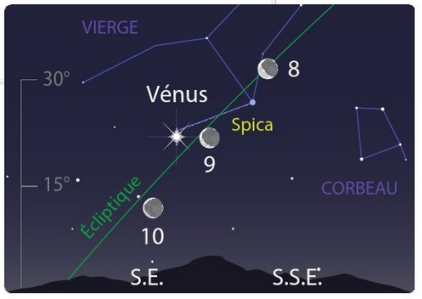
Une splendide pluie d'étoiles filantes le 14

LES GÉMINIDES SONT LA PLUS BELLE ET LA PLUS FIABLE DES PLUIES DE MÉTÉORES DE L'ANNÉE, devant les Perséides du mois d'août, qui sont pourtant davantage connues. Elles atteindront leur maximum le soir du 14. Un taux de plusieurs dizaines d'étoiles filantes par heure devrait être atteint. Par effet de perspective, ces météores sembleront provenir d'un point, le radiant, situé dans la constellation des Gémeaux.

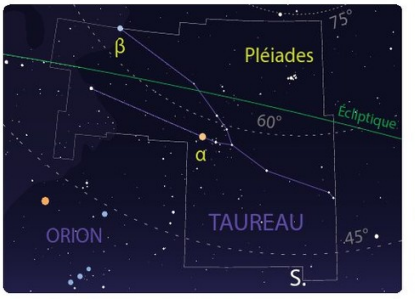
Notre conseil Vous aurez besoin d'une chaise longue confortable, de vêtements chauds, d'une boisson pour éviter la déshydratation… et de beaucoup de patience.

L'appli du mois

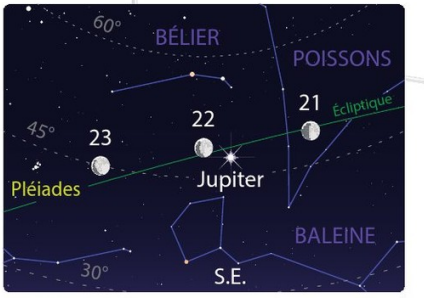
ECLIPSE GUIDE 2023-2027 est une application gratuite en français pour Android et iOS. Elle fournit la liste des éclipses solaires et lunaires jusqu'en 2027, indique si elles seront visibles depuis le lieu de son choix, permet de simuler ces événements et offre un planisphère montrant leur trajectoire avec une chronologie de toutes leurs phases.



LE 9, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, le dernier croissant de Lune sera à moins de 5° de Vénus et près de Spica, l'étoile la plus lumineuse de la constellation de la Vierge.



ALDÉBARAN (α) ET ELNATH (β) SONT LES DEUX ÉTOILES PRINCIPALES DU TAUREAU. Ne passez pas à côté de l'amas d'étoiles des Pléiades, splendide aux jumelles! Il est ici 23 heures.



DU 21 AU 23, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, observez la Lune en phase gibbeuse croissante passer au large de la planète géante Jupiter dans la constellation du Bélier.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de décembre

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

En 2023, le seuil de 1,5 °C sera-t-il dépassé ?

Le réchauffement planétaire franchira probablement 1,5 °C en 2023 ou en sera très proche. L'envolée du thermomètre s'explique par plusieurs facteurs. L'activité du soleil est un peu plus intense, son cycle d'environ onze ans étant en phase croissante. L'éruption volcanique du Hunga Tonga booste un peu l'effet de serre naturel. Trois acteurs majeurs de variabilité interne — terme qui englobe l'ensemble des fluctuations spontanées du climat — jouent cette année. Un événement El Niño s'est développé dans le Pacifique, conduisant à un dégagement de chaleur vers l'atmosphère. Dans l'Atlantique, des vents plus faibles diminuant l'évaporation en surface et une nébulosité réduite accentuant l'ensoleillement, en lien avec l'oscillation nord-atlantique qui pilote une grande part des fluctuations de l'anticyclone des Açores, ont induit une hausse nette de la température de surface. Et dans l'océan Austral, l'étendue très faible de la banquise hivernale amplifie les chaleurs locales.
Mais sans le réchauffement anthropique, ces facteurs épisodiques ne peuvent expliquer à eux seuls ce record planétaire. Même s'il ne faut pas mettre en regard le chiffre de 1,5 °C sur une année donnée avec les niveaux de réchauffement définis dans l'accord de Paris comme des moyennes sur plusieurs décennies, ce dépassement ponctuel donne des coups toujours plus rudes aux écosystèmes et signe déjà, pour certains, des pertes irréversibles. Ne serions-nous pas dans un déni de vulnérabilité à ce climat qui change vite, très vite ? ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHÉMATIQUES PAR CLAIRE MATHIEU

L'informatique fondamentale au service de la démocratie

Quelles retombées l'informatique fondamentale a-t-elle sur d'autres domaines ? On en voit actuellement un exemple à propos du redécoupage de circonscriptions électorales aux États-Unis. La loi y impose des choix presque parfaitement équilibrés du point de vue démographique, mais laisse une très grande latitude pour le dessin des frontières des districts. Ces découpages étaient jusqu'à présent construits à la main, et entraînaient dans certains cas des biais affectant la représentativité des élus (« gerrymandering »). Récemment, des chercheurs en informatique fondamentale s'y sont intéressés. Ils proposent des mesures de compacité et d'équité des découpages, ainsi que des algorithmes pour générer des possibilités de découpage. Cela est pris très au sérieux, et de nombreux États font en ce moment même appel à leur expertise pour aider aux redécoupages nécessaires pour refléter l'évolution démographique mesurée par le recensement de 2020. L'informatique fondamentale est au service de la démocratie ! En France, la loi est à la fois bien plus contraignante pour dessiner les circonscriptions et bien moins stricte pour ce qui est de l'équilibre démographique ; historiquement on n'a pas observé de cas aussi patent de « gerrymandering ». Le problème se pose donc différemment. Au prochain redécoupage des circonscriptions électorales, l'informatique pourra-t-elle aider à faire des choix équitables ? ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Faut-il légiférer sur les techniques subliminales supposées de l'IA ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LEVY

Le règlement européen sur l'intelligence artificielle (IA), nommé AI Act, légifère sur les usages des technologies programmées avec des techniques d'IA en vue de préserver les citoyens d'atteintes à leur sécurité, à leurs libertés et à leur dignité. Il impose des mesures de transparence et de contrôle pour éviter les manipulations, les fuites de données personnelles et les biais. Il va même jusqu'à interdire certaines applications susceptibles de menacer l'intégrité physique et psychologique des personnes, d'exploiter leurs vulnérabilités et de leur causer des préjudices. Parmi elles, le règlement condamne tout *« système d'IA qui a recours à des techniques subliminales au-dessous du seuil de conscience d'une personne pour altérer substantiellement son comportement »*. Comment ne pas souscrire à la prohibition de dispositifs visant à influencer le comportement des individus par-devers eux ? À l'origine de ces techniques, il y a un analyste des comportements, James Vicary, qui affirma en 1957 qu'en ajoutant subrepticement dans un film des images qualifiées de « subliminales » parce qu'inaccessibles à la conscience, et comprenant des phrases du type « Buvez du Coca-Cola » ou « Mangez du pop-corn », on observait une augmentation des ventes de 18 % pour le Coca-Cola et de 50 % pour le pop-corn. La prétendue expérience a suscité beaucoup de réactions et d'inquiétudes, car cela laissait entrevoir une forme de persuasion clandestine. Malheureusement — ou heureusement ? —, les efforts pour la reproduire se sont révélés vains, au point que James Vicary a été forcé d'avouer en 1962, face aux demandes d'éclaircissement, qu'il ne l'avait jamais conduite. S'il existe bien un traitement inconscient de l'information, ce dont la publicité fait abondamment usage, la manipulation des esprits par des techniques subliminales ressort de l'affabulation, et le rôle de l'IA dans cette manipulation plus encore. Dès lors, doit-on les interdire, au risque d'encombrer lois et règlements de clauses inutiles ? ■

L'ŒIL DE LASCAR

Peur sur la ville. À Paris et dans sa région, l'alerte est donnée aux punaises de lit, dont les images filmées — même dans un cinéma ! — pullulent sur les réseaux sociaux. Gros comme des pépins de pomme, ces insectes vivent dans les lits et canapés et se nourrissent de notre sang. Leur recrudescence s'explique par l'essor des voyages et la résistance croissante de ces animaux aux insecticides. D'où la nécessité, pour s'en débarrasser, de privilégier un traitement par la chaleur et le froid. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

IMMUNOLOGIE

Covid : quelle est la durée de protection d'une dose de rappel ?

Tio S.

La protection immunitaire conférée par un rappel vaccinal par ARNm (Pfizer/BioNTech, Moderna) durerait plus d'un an pour une personne en bonne santé, selon une étude américaine publiée en janvier 2023 et reposant sur une modélisation mathématique des effets du vaccin. Ce qui ne signifie pas une efficacité de 100 % à l'échelle de l'individu, car la vaccination a pour principal objectif de stopper la propagation de la maladie à l'échelle de la population entière. Mais pour les patients plus à risque parce qu'atteints de cancer ou immunodéprimés, le rappel de vaccination devrait intervenir plus fréquemment, tous les quatre à six mois selon ce modèle. ■ **C. L.**

ORNITHOLOGIE

Quel oiseau détient le record d'altitude de vol ?

Zephyr C.

L'altitude de vol record pour un oiseau a été observée chez le vautour de Rüppell *(Gyps rueppelli)* le 29 novembre 1973, alors qu'il était en train de planer à 11 300 mètres au-dessus d'Abidjan (Côte d'Ivoire). À cette hauteur, le rapace profite des courants de vents forts pour parcourir de grandes distances. S'il est capable de voler aussi haut (en comparaison, la majorité des oiseaux ne volent pas au-dessus de 1500 m), c'est grâce à une protéine spéciale, une variante de l'hémoglobine, qui lui permet d'absorber efficacement l'oxygène malgré sa faible quantité disponible à cette altitude. ■ **L. M.**

ANTONIELORGNIER/BIOSPHOTO

S'il n'y a pas d'hiver sous les tropiques, on trouve de la neige en altitude (ici le volcan Chimborazo en Équateur, qui culmine à 6268 mètres).

CLIMATOLOGIE

Est-ce qu'il peut neiger au niveau de l'équateur ?

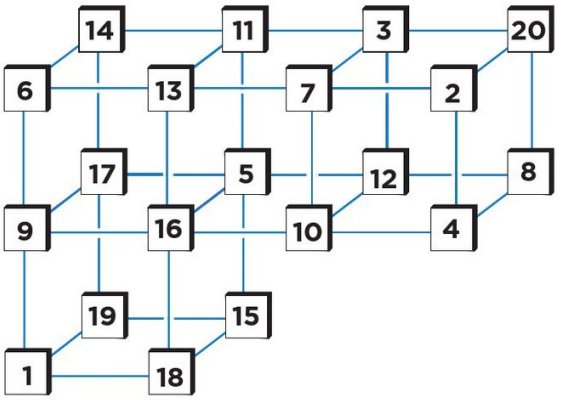
Robert M.

Oui ! Il peut en principe tout à fait neiger dans les pays situés au niveau de l'équateur terrestre, cette ligne imaginaire qui sépare les deux hémisphères. Mais ce phénomène reste exceptionnel, car le climat « équatorial » est marqué par des températures élevées et stables tout au long de l'année. À l'équateur il n'y a pas d'hiver : cette saison chaude et pluvieuse est la seule. Ceci s'explique par la position de la Terre par rapport au Soleil. Dans sa course dans l'espace, notre planète est légèrement penchée. Cette inclinaison ne varie pas, mais comme la Terre tourne autour du Soleil, l'angle des rayons solaires qui la frappent varie. En été, dans l'hémisphère Nord, il est plus élevé. Le Soleil est haut dans le ciel et la quantité d'ensoleillement est plus importante, il y fait donc chaud. À l'inverse, l'hiver, l'angle est plus faible, le Soleil plus bas et l'ensoleillement est moins important ; il fait plus froid et le temps est favorable aux chutes de neige. Mais au niveau de l'équateur, l'angle des rayons solaires est pratiquement toujours constant. Pour espérer trouver de la neige dans cette zone, il faut donc partir en montagne, la température chutant avec l'altitude. Ainsi, il est possible de trouver des glaciers sous les tropiques ! La plupart sont situés dans la cordillère des Andes et on y trouve même des neiges éternelles sur les flancs du volcan Cayambe. Les glaciers d'Amérique du Sud sont néanmoins fortement menacés par le réchauffement climatique. ■

Joël Ignasse

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 921, novembre 2023

Sudo-cube



Lire en comptant

Soit x le nombre de « Tintin », y le nombre de « Lucky Luke » et z le nombre de « Babar » , on a :
x + y > z
2x + 1 = z, donc
x + y > 2 x + 1, donc
y > x + 1
Lionel a donc au moins deux « Lucky Luke » de plus que de « Tintin ».

De l'ordre !

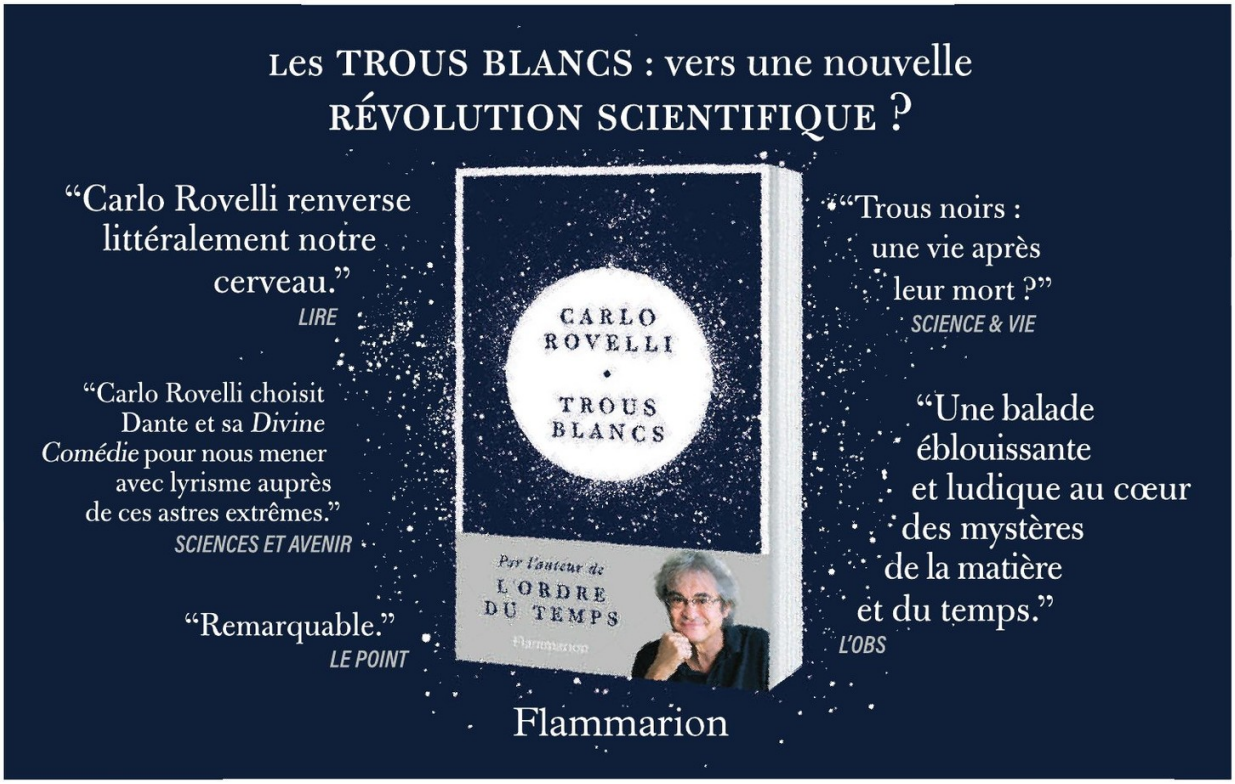
1 + 23 x 45 – 67 x 8 = 500

Gratte-ciel

	3	2	2	3	
2	10	40	30	20	3
3	20	30	60	50	2
3	40	50	20	60	1
2	30	20	40	10	2
	2	2	2	2	

Lettres sur mer

AMERIGO VESPUCCI :
En prenant la première lettre du premier mot, la deuxième du deuxième mot, la troisième du troisième mot et ainsi de suite.
ALAIN EMILE ELENA HENRI NAGUI GAELE TOMMY SAVIN JULES AGNES PAULA SUZIE LUCAS BRICE JORDI



PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

L'égalité dans l'ordre

Comment réaliser cette égalité en utilisant les chiffres de 9 à 1 dans cet ordre et à l'aide des 4 opérations et des parenthèses ?

9 8 7 6 5 4 3 2 1 = 555

Addition lettriste

Remplacez chaque lettre par un même chiffre pour réaliser cette addition :

```
  DEUX
+ DEUX
 CINQ
```

Logique culinaire

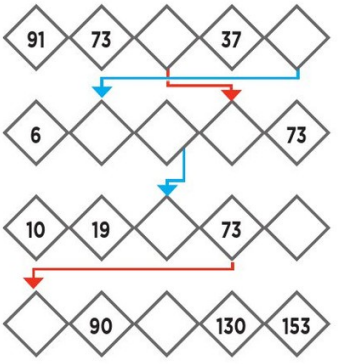
Quelle est la logique de ce menu et quel prix devrait être affiché pour le gigot ?

PLAT DU JOUR

Mérou	13
Raie	36
Rognons	54
Gigot	?

Logique fléchée

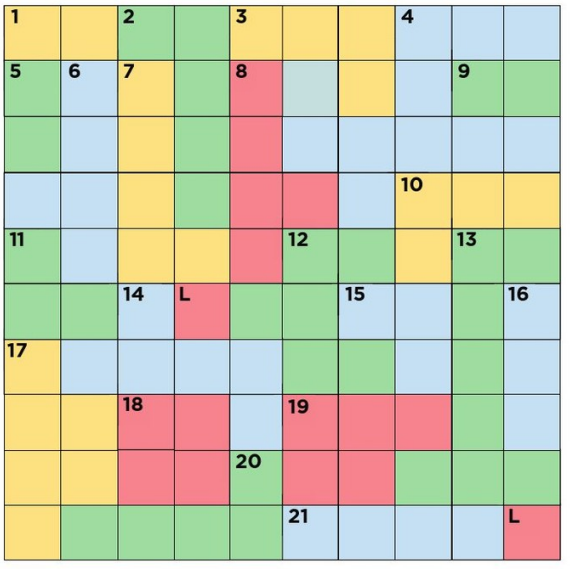
À chaque ligne correspond une suite logique. Complétez-les, sachant que les flèches relient des cases identiques.



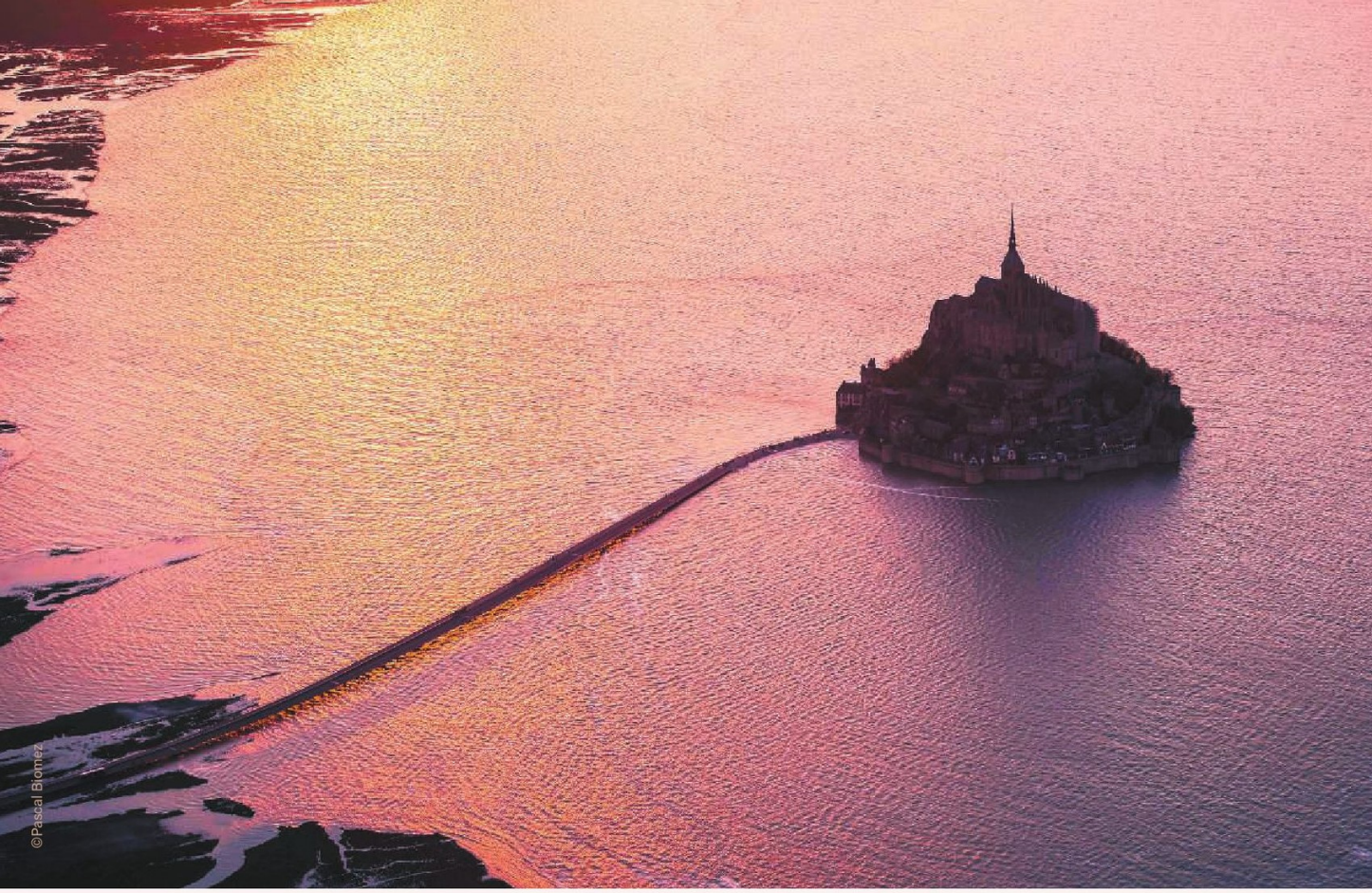
Panagramme

Chaque ligne et chaque colonne contiennent les lettres formant « HALE SI BRUN ». Toutes les lignes sont différentes ainsi que toutes les colonnes. Dans chaque zone colorée, il y a un mot dont la définition correspond au numéro en haut à gauche de la zone. Si la zone ne comporte qu'une lettre, c'est la lettre elle-même. Les lettres de ces mots sont mélangées.

1 : Note.
2 : Les Français s'arrêtent à 4.
3 : Plantes à fleurs bleues.
4 : Personnages hors du commun.
5 : Croquants depuis 1896.
6 : Sont hautes sur les mâts.
7 : Titre honorifique en Inde.
8 : Eva de sinistre mémoire.
9 : Animal réputé pour sa lenteur.
10 : Ville du Gard.
11 : Argile rouge.
12 : Les nageurs s'en méfient.
13 : Grandes feuilles au jardin.
14 : Se faire bien entendre.
15 : Quand on s'adresse à Cocotte.
16 : Ligne trigonométrique.
17 : Mettre du gras.
18 : Disposas des couleurs.
19 : Lavent ou soignent.
20 : Couleur en héraldique.
21 : Fleuve européen.



Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues



Soutenez la préservation du Mont Saint-Michel et de sa baie

Contactez-nous
pour faire un don* et bénéficier
d'une réduction fiscale :
mecenat@montsaintmichel.gouv.fr

*Don éligible au dispositif fiscal du mécénat (réduction de 66% de l'impôt sur le revenu pour les particuliers et réduction de 60% de l'impôt sur les sociétés pour les entreprises).

la baie, le village, l'abbaye

mont saint michel

nouveau

CRÉATION ÉPHÉMÈRE N°5

Un trésor gustatif rare issu de grains Arabica Bourbon du Rwanda

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.